

本調査研究はモーターボート競走公益資金による
(財)日本船舶振興会の補助金を受けて実施したものである

第182研究部会

海洋構造物の重防食に関する研究

報告書

昭和60年3月

社団法人
日本造船研究協会

海洋構造物は船舶と異なり、定期的に入渠することもなく、かつ、超長期の耐用年数を要求される場合が多いため、従来船舶で行われてきた防食対策とは異なった方法が必要である。

本研究は、海洋構造物に適したメインテナンスフリー指向の超重防食法及び維持補修法を調査研究するため、本年度は重防食材料の調査、海洋環境下での構造物の防食性試験・調査、寿命推定法の検討 メインテナンス方法の調査検討及び防食施工法の調査検討を行った。

はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和59年度補助事業「海洋構造物の基礎的研究」の一部として、日本造船研究協会第182研究部会において実施した「海洋構造物の重防食に関する研究」の成果をとりまとめたものである。

第182研究部会委員名簿（敬称略・五十音順）

部会長	南 義夫	
幹事	在田 正義（船舶技術研究所）	石井 紘二（石川島播磨重工業）
	太田 昭三（三菱重工業）	太田 元久（日本防蝕工業）
	翁長一彦（船舶技術研究所）	川田 修（日本ペイント）
	神例昭一（住友重機械工業）	久保 淳（三井造船）
	藏野亘弘（関西ペイント）	佐野俊一（日本油脂）
	高久洋（日本鋼管）	平井 靖男（日立造船）
	廣田信義（中国塗料）	深迫紀夫（川崎重工業）
	外村貞一（大日本塗料）	三好 貢
	安田健二（日本海事協会）	
委員	青木真一（川崎製鉄）	浅井 彰（新日本製鉄）
	石田富之輔（日本ペイント）	井上孝一（日本郵船）
	小川和彦（カナエ塗料）	鐘ヶ江官朗（日立造船）
	神田三（神東塗料）	小島喜七郎（住友重機械工業）
	堺由輝（川崎重工業）	佐武二郎（住友金属工業）
	鈴木昭雄（鬼田化学工業）	鈴木茂（関西ペイント）
	実藤公一（三井金属鉱業）	善一章（中川防蝕工業）
	高橋堅太郎（日本ピストリング）	高橋弘孝（日本アマコート）
	久野忠一（川崎製鉄）	平山昭邦（ヘンペル塗料）
	峰久節治（日立造船）	諸江昭洋（東亜ペイント）
	山崎進吾（日本電気）	
討議参加者	飯田勇（住友重機械工業）	石崎房雄（中川防蝕工業）
	植田健二（三菱重工業）	大橋治（日本鋼管）
	岡田正三	岡本一（三井造船）
	帯屋経昭（鬼田化学工業）	織田凌司（三井造船）
	加門稔邦（新日鉄）	神浦真帆（日本鋼管）
	木村朝夫（中川防蝕工業）	桑守彦（中川防蝕工業）
	柴田昭男（三菱重工業）	杉山正佳（日立造船）
	未武幸男（日本油脂）	仙波亨（東亜ペイント）
	長浜修（川崎重工業）	中間晃（関西ペイント）
	中村倭章（鬼田化学工業）	二宮守之（中国塗料）
	播谷圭亮（石川島播磨重工業）	平井陽一（石川島播磨重工）
	平林茂樹（日立造船）	平間敏郎（関西ペイント）
	藤山正三（鬼田化学工業）	松岡一祥（船舶技術研究所）

宮嶋時三（東京商船大学）

森田赳夫（日本ペイント）

若林英樹（日本ペイント）

武藤博（石川島播磨重工業）

吉田守男（東亜ペイント）

目 次

まえがき	1
1. 重防食材料の調査	4
1.1 調査の目的	4
1.2 非金属防食材料の調査	4
1.2.1 防食材料の調査	4
1.2.2 防食材料の機械的強度や劣化と防食性	8
1.3 金属性防食材料及び数種防食法の併用効果に関する調査	36
1.3.1 金属防食材料のアンケート結果	36
1.3.2 数種防食法の併用効果に関するアンケート結果	36
1.3.3 文献調査	36
2. 海洋環境下での構造物の防食性試験	37
2.1 防食性試験の目的	37
2.2 浮体試験体の概要及び試験体設置場所	37
2.2.1 浮体試験体の概要	37
2.2.2 試験体の設置場所	38
2.3 防食性調査	38
2.3.1 浮体本体被覆材の3箇年経過後の調査	38
2.3.2 浮体応力部被覆材の3箇年経過後の調査	39
2.3.3 試験片被覆材の経年変化(海中部)	40
2.3.4 気象・海象の調査	41
2.4 考察	41
2.4.1 実環境浮体の一般部と実験室結果との関係	41
2.4.2 繰返し応力について	42
2.5 構造物の防食性試験に関するまとめ	42
3. 防食材料の寿命推定法に関する検討	63
概要	63
3.1 促進試験と塗膜劣化判定法	65
3.1.1 カレントインターラブター法による塗膜劣化判定法(59年度実施)	65
3.1.2 過去に検討した促進試験と塗膜劣化判定法	68
3.1.3 促進試験と塗膜劣化判定法のまとめ	69
3.2 防食性評価技術に関する検討	78
3.2.1 防食性評価の手順	79
3.2.2 热冷衝撃による塗膜劣化の促進法	79
3.2.3 塗膜厚分布の特性	81
3.3 塗膜の初期劣化過程の解析	96
3.3.1 塗膜の限界ひずみによる性能評価	96
3.3.2 塗膜の電気抵抗による性能評価	97
3.3.3 劣化促進試験の促進効果	97
3.3.4 エポキシ系防食塗膜の初期劣化	99

3.4 防食材料の寿命推定に関するまとめ	104
4. メインテナンス方法の調査検討	105
4.1 調査検討の目的	105
4.2 調査内容	105
4.3 浮体構造物の調査	109
4.4 浮体構造物のメインテナンス	113
4.5 上部構造物の調査及びメインテナンス	120
4.6 水中メインテナンス試験板	123
4.7 洋上大気暴露試験板	126
4.8 水中硬化型塗料によるメインテナンスの検討	139
4.9 水中補修材料の長期防食性試験	147
4.10 水中機器によるメインテナンス実験	148
4.11 調査試験結果について	151
4.12 メインテナンス方法に関するまとめ	155
5. 防食施工法の調査検討	158
5.1 調査検討の目的と検討内容	158
5.2 ライニング皮膜への塗り重ね特性に関する検討(59年度実施)	159
5.2.1 供試材料	159
5.2.2 試験内容	160
5.2.3 試験結果と考察	160
5.3 まとめ(ライニング施工マニュアル)	169
あとがき	174

まえがき

鋼構造物の腐食・防食面からみると、海洋環境は内陸環境と大きく異なり、非常に苛酷な環境である。この厳しい環境にさらされる海洋構造物は、近年ますます大型化し、多様化する傾向にあり、一般船舶のように定期的に入渠することもなく、しかも耐用期間は超長期にわたるものが多い。従って、定期補修が困難なこれらの海洋鋼構造物に対しては、建造初期において、長期間の耐久性を有する防食対策が必要である。

一般に鋼構造物の防食対策に関しては、構造物の耐用寿命、維持補修の難易、経済性など総合的な観点から検討し、最適材料で最適仕様を組み、最適な方法で施工して、選択した材料の防食機能を最大限に発揮させることができ望ましい。このように、最適な材料や仕様を選択して実構造物に適用してゆくためには、材料面と施工面の両面からそれらの機能や特性を十分に把握するとともに、実環境下においてそれらの経時的な変化や挙動についても事前に検討しておく必要がある。さらに、構造物の稼動後における維持補修法についても技術的に確立しておくことが望ましい。

そこで、本研究は海洋鋼構造物に適したメインテナンスフリー指向の重防食法及び維持補修法などについて調査研究を行うことを目的として、昭和55年度から5箇年にわたりて実施してきたものである。本研究では検討実施に先立ち、各種防食材料の実用化状況を調査するとともに、少なくとも10年間はメインテナンスを必要としない防食仕様として、塗装系仕様5種、ライニング系3種、合計8種の仕様を設定し、これらの仕様を本研究の基本的な標準仕様として各種の調査検討を進めた。

本研究の最終年度である59年度において実施した調査検討項目とその内容並びに5箇年間にわたりて実施してきた項目ごとの内容を要約すると以下のとおりである。

(1) 重防食材料の調査

初年度(55年度)には、非金属防食材料、金属防食材料及び数種防食法の併用効果など、防食材料を主体に、材料メーカーと施工メーカーを対象にアンケートを行った。また、重防食を指向した代表的な防食仕様8種に対して、皮膜の機械的強度特性について、4箇年にわたりてその経時変化や挙動を追跡調査した。さらに、同防食仕様に対し、暴露や海水浸漬試験を行って、その防食性能を調査した。

(2) 海洋環境下での構造物の防食性試験

一般に、海洋構造物の設置場所は苛酷な環境であり、しかも点検のための入渠もないため、適用した防食仕様の効果を実構造物で詳細に調査することは容易なことではない。従って、長期耐久性を有する防食仕様の選定には、各種の実験室試験結果と、施工実績によって決められる場合が多く、特に実環境下での試験は重要ではあるが、慎重を要するものである。

そこで、本研究では、各種実験室試験と同一仕様をモデル構造物に施工し、実際の海洋環境に設置して、諸データを取り、実験室試験結果との相関性及び実環境下での長期耐久性を確認するために実施した。

(3) 防食材料の寿命推定法に関する検討

長期間の耐久性を有する防食材料に対し、比較的短期間の間でその性能特性や防食寿命を判定・評価するには、通常の試験方法では難しい。そこで、本研究では、短時間で材料を劣化させる、いわゆる劣化促進方法を検討するとともに、その劣化の度合を数値的に判定できる方法についても検討し、防食材料の寿命を早期に推定する技術を確立することをねらいとして実施した。59年度は塗膜劣化促進に対する判定法として、カレントインターラプター法について検討し、塗膜下腐食速度と塗膜電気抵抗を求め、これらの結果をもとに防食寿命推定を試みた。また58年度に引き続き、熱冷衝撃実験を行い、インピーダンス測定、付着力測定を行って、劣化促進効果を確認した。さらに、エポキシ塗膜に対し、過去のデータをベースに初期劣化過程の解析を行った。

(4) メインテナンス方法の調査検討

点検・補修のために入渠することの困難な海洋構造物に対しては、稼動現地において、必要に応じてメインテナンスが行われる。そのためにはメインテナンス用材料の選定やメインテナンス施工法に関する技術的な確立が必要である。そこで、本研究では、メインテナンスを対象とした浮体構造物（55年度設置）を用いて、水中での検査、清掃（生物除去）、塗装及び板厚測定などメインテナンス関連の各種作業を行うとともに、適用した防食塗膜の防食性能や付着生物による塗膜への影響などについても調査した。また、暴露環境でのメインテナンスの検討や補修塗装用水中硬化型塗料の施工性や性能についても調査検討した。

(5) 防食施工法の調査検討

有機樹脂系ライニング材料は長期防食用として注目されているが、その種類も多く、海洋構造物への適用実績も十分であるとはいえないものもある。そこで、本研究では代表的なライニング材4種を選択し、施工に関連する数種の問題点について、4箇年間にわたって検討してきた。59年度には、これらライニング皮膜に同種材料あるいは一般塗料を上塗りする場合の前処理法について検討するとともに、過去3箇年に得られた各種施工上の特性や諸条件をベースとしたライニング材料の施工マニュアルの作成を行った。

また、海洋構造物の腐食・防食の実状については、適用された防食仕様が明確であり、しかも長期にわたり実環境に設置された実構造物を詳細に観察することが最も正確な情報を得る手段であるが、これはなかなか容易なことではない。しかし、幸いにして本研究部会では、初年度（55年度）において、沖縄海洋博覧会（50～51年開催）の時に建造され、現在も観光施設として利用されている実海洋構造物「アクアポリス」の腐食・防食状況を調査する機会を得た。これらの詳細については研究資料第341号を参照願いたい。

なお、本報告書は、本研究部会の下に実施された59年度の研究内容並びに5箇年間の研究内容について取りまとめられたものであるが、各調査検討項目において実施された内容項目をまとめると別表に示すところである。

「海洋構造物の重防食に関する研究」5箇年間の実施内容

調査検討項目	研究実施年度	55 年度	56 年度	57 年度	58 年度	59 年度
1. 重防食材料の調査	1.1 非金属防食 材料の調査	アンケート調査 実験開始	追跡調査	追跡調査	追跡調査	追跡調査、まとめ
	1.2 金属防食材料の調査	アンケート調査				
	1.3 数種防食法の併用効果の調査	アンケート調査				
2. 海洋環境下での構造物の防食性試験						
3. 防食材料の寿命推定法に関する検討	3.1 促進試験と塗膜劣化判定法	実験計画、ガス透過率 促進試験と電気的評価	イオン電極法の検討 実験(熱冷衝撃試験)	カーボンインターラフタ法の検討 実験(熱冷衝撃試験)		
	3.2 防食性評価技術に関する検討					
	3.3 評価法の調査	資料調査 試験体設計・設置 資料調査	調査・観察 メインテナンス実験			促進率の評価 調査、観察、まとめ メインテナンス実験
4. メインテナンス方法の調査検討						
	5.1 ショックプライミング方式の適用性		調査検討	調査検討		
	5.2 基地調査法の影響		調査検討	調査検討		
5. 防食施工法の調査検討	5.3 環境と皮膜硬化		調査検討	調査検討		
	5.4 性状特性と施工条件					
	5.5 塗り重ね特性					
6. 海洋構造物の腐食防食状況の調査	5.6 施工マニアルの作成			調査検討	調査検討	調査検討、まとめ
	沖縄海洋博公園「アカアボリス」の調査					
(研究報告)	研究資料 第341号	研究資料 第347号	研究資料 第357号	研究資料 第369号	研究資料 第369号	完了資料 第376号(本号)

1. 防食材料の調査

1.1 調査の目的

洋上大気部から海土中部にいたる各海洋環境下におかれる鋼構造部材に対し、現在適用されている防食材料としては、非金属系及び金属系防食材料があげられる。これらの防食材料と、その防食材料を用いた防食仕様について、調査を行うとともに、特に非金属系防食材料の中から、代表的な被覆防食材料（塗料及びラミネーティング材料）を選択して長期防食仕様を設定し、その機械的強度や防食性についても追跡調査して耐久性を評価するために検討した。

1.2 非金属防食材料の調査

1.2.1 防食材料の調査（55年度実施）

本研究部会参加の各社並びに他の国内防食材料メーカーに対してアンケートを行ったところ、材料メーカー12社、造船会社3社、合計15社の回答を得ることができた。各社から回答された防食仕様は、洋上大気部、飛沫部、海中部及び海上中部に分れ、各部位について複数の仕様が寄せられた。そのため、仕様数は回答社数を上回ったものとなった。以下アンケート結果を要約して説明する。（詳細は55年度報告書、研究資料No.341号を参照）

(1) 洋上大気部

推奨仕様35種を種類別にまとめて、表1.2.1.1に示した。

- (a) 多いのは無機ジンク+エポキシ塗装あるいは無機ジンク+エポキシにビニルやウレタン塗装系で、塗装回数や膜厚は必ずしも同じではない。
- (b) 一次表面処理の下地処理グレードはSIS Sa 2.5がほとんどで、一部S/P後のサンドスイープがある。表面粗さは30～100μmの範囲内にあり、50～80μmが最も多い。
- (c) 期待耐用年数は短いもので、塩化ゴム塗装系(140μm)の3年、最長にはレジンモルタル、ガラスフレーク塗装系の30年以上が見受けられ、10年前後が大部分を占めている。これらに要する施工費用は4,000～10,000円/m²で6,000～8,000円/m²が多い。（55年度時点）
- (d) 実績としてはジャケットリグ、セミサブリグ、デッキ構造物及び本四橋採用塗装系等多数で、実績がないもの（亜鉛溶射+塗装）も推奨されている。
- (e) 洋上大気部は補修が容易なためか、期待耐用年数を短く、補修でカバーしているのが特長のようである。（表1.2.1.1）

(2) 飛沫部

推奨仕様35種を種類別にまとめて表1.2.1.2に示した。

- (a) ポリエステルガラスフレークが最も多く、つづいてレジンモルタルや無機ジンク+エポキシ系塗装の仕様である。
 - (b) 下地処理グレードはSIS Sa 2.5以上が最も多く、一部の無機ジンクやレジンモルタル及びガラスフレークライニングでSa 3.0が推奨されたものもある。表面粗さは30～100μmの範囲内、50～80μmが最も多い。
 - (c) 期待耐用年数は短いもので5年[無期ジンク(40μm)+タールエポキシ(200～300μm)]、長いものでポリエステルガラスフレークライニング(1,500μm)があり、10～20年が最も多い。鋼管杭に対するポリエステルFRP/ポートランドモルタルは50年の耐用年数となっている。
 - (d) 実績面ではリグ、ジャケット、鋼管杭、浮消波堤など多数で、鋼管杭でのFRP/モルタルは国内全域での実績となっている。
- 施工費は高価なものが多く、ペトロリウム防食系やレジンモルタル系には3～5万円/m²のものもある。（55年度時点）（表1.2.1.2）

(3) 海 中 部

推奨仕様 33 種も種類別にまとめると表 1.2.1.3 に示した。

- (a) 無機シンク + タールエポキシ、タールエポキシ塗装、ポリエスチルガラスフレークライニングの仕様が多く、電気防食併用あるいは電気防食単独の仕様も推奨されている。
- (b) 下地処理グレードは S I S Sa 2.5 以上がほとんどで、表面粗さは 30 ~ 100 μm の範囲内で 50 ~ 75 μm が大部分を占めている。
- (c) コストは前項飛沫部仕様と同じように幅が大きく、低いものでは塩化ゴム塗装と電気防食併用 (AE アノード 54 mA/m²) で 4,000 円/m² から鋼管杭などの FRP / モルタル 5 万円/m² まであり、電気防食併用時は設計条件によるため、コストが明確でない。(55 年度時点)
- (d) 期待耐用年数は塗装ライニング系で 5 ~ 30 年、鋼管杭 FRP / モルタル 50 年など幅が大きく、電気防食併用塗装系で 10 ~ 20 年のものが多い。実績は前項飛沫部とほとんど同じである。

(表 1.2.1.3)

(4) 海 土 中 部

回答仕様は少く、推奨仕様を種類別にまとめて表 1.2.1.4 に示した。

- (a) 無機シンク + タールエポキシが多く、ガラスフレークライニング、タールエポキシ塗装レジンモルタル等で、電気防食併用を推奨している。
- (b) 下地処理グレード、表面あらさも前項同様で、コストは塗装ライニング費 4,000 ~ 8,000 円/m² に電気防食費用が加算される。(55 年度時点)
- (c) 期待耐用年数の回答は少なかった(10 ~ 15 年)。補修が困難であり、電気防食が耐用年数に大きく影響することから当然のことであろう。実績としてはジャケットリグや鋼管杭などである。

(表 1.2.1.4)

表1.2.1.1 洋上大気部防食例

符号	種類	仕様数
1	無機シンク + エポキシ塗料	5
2	無機シンク + エポキシ塗料 + ビニル塗料	4
3	無機シンク + エポキシ塗料 + ウレタン塗料	4
4	塩化ゴム塗料	3
5	エポキシガラスフレーク	3
6	無機シンク + ビニル塗料	3
7	タルエポキシ塗料	2
8	無機シンク + 塩化ゴム塗料	2
9	亜鉛浴射 + エポキシ + ウレタン系塗料	2
10	シンクエポキシ + エポキシ塗料	1
11	エポキシ塗料	1
12	ビニル + 塩化ゴム系塗料	1
13	無機シンク + エポキシ + アクリル塗料	1
14	エポキシレジンモルタル	1
15	ポリエステルガラスフレーク	1
16	無機シンク + エポキシ + 塩化ゴム塗料	1
合計		35

表1.2.1.2 飛沫部防食例

符号	種類	仕様数
1	ポリエステルガラスフレーク	9
2	エポキシレジンモルタル	6
3	無機シンク + エポキシ塗料	5
4	無機シンク + タールエボキシ塗料	2
5	無機シンク + ビニル塗料	2
6	エポキシガラスフレーク	2
7	エポキシ塗料	1
8	タールエボキシ塗料	1
9	無機シンク + エボキシ + ビニル塗料	1
10	タールエボキシ + ビニル塗料	1
11	塩化ゴム塗料	1
12	ポリエステルFRP / モルタル	1
13	エボキシ + エボキシFRP	1
14	亜鉛浴射 + エボキシ塗料	1
15	ペトロラタムベースト + ブラムテープ + ブラスチックカバー	1
合計		35

表 1.2.1.3 海中部防食例

符号	種類	仕様
1	無機ジンク+タールエボキシ塗料	6
2	ポリエスチルガラスフレーク	5
3	タールエボキシ塗料	4
4	エボキシレジンセルタル	3
5	エボキシ塗料	2
6	電気防食のみ	2
7	無機ジンク+エボキシ塗料	1
8	エボキシガラスフレーク	1
9	ジンクエボキシ+タールエボキシ塗料	1
10	タールエボキシ+ビニル塗料	1
11	無機ジンク+エボキシ+ビニル塗料	1
12	タールエボキシガラスフレーク	1
13	ビニールタール塗料	1
14	ポリエスチルFRP/モルタル	1
15	エボキシ+エボキシFRP	1
16	塩化ゴム塗料	1
17	ポリエスチルガラスフレーク+ポリエスチルマット	1
合計		33

(由) 電気防食併用を含む。

表 1.2.1.4 海土中部防食例

符号	種類	仕様
1	無機ジンク+タールエボキシ塗料	4
2	ポリエスチルガラスフレーク	2
3	タールエボキシ塗料	2
4	無機ジンク+エボキシ塗料	1
5	タールエボキシガラスフレーク	1
6	ジンクエボキシ+タールエボキシ塗料	1
7	エボキシレジンモルタル	1
8	電気防食のみ	1
合計		13

(由) 電気防食併用を含む。

1.2.2 防食材料の機械的強度や劣化と防食性

(1) 供試防食材料とそれらによる防食仕様

供試防食材料としては、現在、船舶や海洋構造物の長期防食用塗料として採用されている各種塗料の中から代表的なものを選択し、これらの供試塗料を用いて長期防食用として5種類の塗装系防食仕様を設定した。

さらに、今後海洋構造物などの長期防食用として注目されている各種ライニング材料の中から代表的な3種類を選択し、3つのライニング系防食仕様を設定した。

以上の各種供試防食材料の性状を表1.2.2.1及び表1.2.2.2に示す。また、設定した8種の防食仕様については表1.2.2.3に示す。なお、これらの8種の防食仕様は、本研究部会における基本的な標準仕様とし、第2章以降の各調査検討項目においても検討対象として採用している。

(表1.2.2.1, 表1.2.2.2, 表1.2.2.3)

(2) 試験項目と試験方法

8種類の防食仕様に基き作製した試験板あるいは単離膜(フリーフィルム)を海岸暴露あるいは海水浸漬して、防食皮膜の機械的な強度や劣化度合の経時変化を定量的に把握するとともに、防食性についても検討・評価するため以下のような各種試験を実施した。なお、これらの試験方法の選定に際しては、初期から5箇年間にわたって定期的に実施することを考慮し、試験条件には再現性を有し、しかも定量的な実験値(データ)を得るために、できるだけ規格試験を準用することにした。また、これらの各種試験は皮膜の経時変化を知るため、約6箇月経過ごとに実施あるいは調査観察を行った。

(a) 曲げ試験

本試験は皮膜の耐屈曲性をはじめ鋼材面との付着性などを評価するために実施したものであり、JIS G 3492¹⁾に準拠した曲げ試験を行った。すなわち、間隔240mm、半径3mmのささえ刃の上に皮膜を下にして置き、半径13mmの鋼製丸棒を試験板の中心線上に水平に置き、これに均等に力を加え、20mm/minの速度で皮膜にきれつが生じるまで押し下げる。きれつ発生は肉眼により注意深く観察した。最初のきれつが発生したときのたわみ(mm)を記録し、ついで、たわみが38mmになるまで押し下げたのち試験板をはずし、はく離しやすくなっている部分の皮膜をすべて取り除き、露出した面積を測る。最初のきれつが発生したときのたわみ(mm)と、38mmたわんだときのはく離面積(cm²)をそれぞれ2枚の試験板について試験し、その平均値を求めた。

(b) 衝撃試験

本試験は皮膜の耐衝撃性とともに鋼材面への付着性などを評価することを目的に実施したものであり、JIS G 3492¹⁾に準拠した衝撃試験を行った。なお、本試験は皮膜面に衝撃を与える直接衝撃試験と皮膜裏面から衝撃を与える間接衝撃試験がある。

(i) 直接衝撃試験

試験板の皮膜を上にして平らな木製台の上に置き、表面をよくみがいた650grの鋼球を2,400mmの高さから垂直に皮膜上に落下させる。この鋼球の落下位置は、試験板の各縁から100mm以上の距離にある点とする。この衝撃試験のうち、はく離しやすくなっている皮膜をすべてはぎとり、露出した部分の面積を測り、2枚の試験板につき、はく離面積(cm²)の平均値を求めた。

(ii) 間接衝撃試験

試験板の皮膜を下にし、直径90mmの穴が貫通している木製台上に置き、直接衝撃試験の場合と同様に鋼球を試験板の鋼面上(皮膜裏面)に垂直に落下させ、はく離面積(cm²)を測り、2枚の平均値を求める。ただし、その衝撃点は、試験板の各縁から100mm以上の距離にある点で、かつ木製台の穴の中心点であるようにする。なお、木製台の大きさは、たて・よこ各300mm、厚さ50mm以上のものとし、材質は松、ひのき、ラワンなどとする。

(c) 引張付着力試験

本試験は皮膜の鋼板素地への付着性を評価する目的で実施したものであり、JIS A 6909²⁾に準拠した引張付着力試験を行った。

すなわち、試験板を付着力試験に適した寸法(40×40mm程度)に切断加工して試験片を作り、この試験片の皮膜面に直径25mmの円筒形の試験シグを接着剤を用いて接着させる。接着剤が十分に硬化したのち、付着力試験の面積を一定にするため、試験シグ周辺部の皮膜をナイフなどにより鋼板素地に達するまで切り込む。この試験シグを接着させた試験片を引張シグに製着し、インストロン引張試験機などにより、皮膜面に対し垂直方向に5mm/minの一定速度で引張り、破断するまでの最大荷重を測定する。付着力(Kgf/cm²)はそれぞれ次式によって求めた。

$$F = \frac{P}{4.91}$$

ここに、F：破断応力[Kgf/cm²]

P：破断するまでの最大荷重[Kgf]

ただし、破断面が鋼板素地からであれば、Fは皮膜の真の付着力であるが、破断面が皮膜の凝集破断や接着剤面の破断であれば、Fは皮膜の凝集力や接着剤の接着力であり、皮膜の真の付着力はさらに大きい値であると評価した。なお、本付着力試験は、1回1試料につき、5個づつ繰返し行って、その平均値で示した。

(d) 硬さ試験

塗装系皮膜のように薄膜で、しかも比較的軟いものと、ライニング系皮膜のように厚膜でかなり硬いものを同一手法を用いて調査し、評価する最適な硬さ試験方法はない。そこで、本研究では、皮膜の厚さによって、試験方法を区別した。

(i) 膜厚1.0mm以下の皮膜に対する硬さ試験(塗装系皮膜)

JIS K 5400³⁾に準拠して行った。すなわち、皮膜の引っかき抵抗性を、鉛筆の芯の硬さを変化させたときの皮膜の傷や破れの度合で調べ、硬さ試験とする。この試験には、塗膜用鉛筆引っかき試験機(JIS K 5401)を用いた。

(ii) 膜厚1.0mm以上の皮膜に対する硬さ試験(ライニング系皮膜)

ASTM D 2583⁴⁾に準拠して行った。すなわち、一般に樹脂ライニング皮膜の硬さ測定に適用されている方法であり、皮膜に対して針押込み型硬度計(BARCOL IMPRESSOR GYZ J 934-1型あるいはGYZ J 935型)を用いてバーコル硬さを測定した。

なお、皮膜厚さ1.0mm未満のライニング皮膜については、予め1.0mm以上の厚さを有する測定点を作って測定した。

(e) 引張試験

本試験は皮膜の引張強さや伸びを評価するものであり、塗装系皮膜、ライニング系皮膜ともに単離膜(フリーフィルム)を作製して実施した。引張試験に供する試験片の作製に際しては、塗装系皮膜についてはJIS K 6734⁵⁾を、ライニング系皮膜についてはJIS K 7113⁶⁾を準用し、それぞれ単離膜からダンベル状に加工した。これらのダンベル状の試験片の形状や寸法を図1.2.2.1の(1)と(2)に示す。

また、引張試験にはインストロン引張試験機を用い、5mm/minの一定速度で引張り、試験片の破断荷重と伸びを求め、各仕様皮膜に対し、同一条件で繰り返し5枚の試験片について実施し、その平均値で示した。(図1.2.2.1)

(f) 繰返し応力付加試験

本試験は、海洋における波浪などにより被覆鋼材に対して繰返し曲げひずみが付加された場合を想定し、皮膜の耐久性を評価することを目的に実施したものである。従って、海水中において、被覆鋼板に対して一定速度で、一定の繰返し曲げひずみ(一定たわみ)が付与できる「繰返し応力付加試験

装置」を作製した。本試験装置の仕様は表1.2.2.4に示し、その組立図を図1.2.2.2に示す。また、本試験に用いた試験板は応力集中を避けるよう考慮し、図1.2.2.3に示すような形状・寸法にした。
(表1.2.2.4, 図1.2.2.2, 図1.2.2.3)

なお、この試験装置を用いて実施する試験の諸条件は以下のように設定した。

(イ) 応力付加条件

- ① 繰返し速度 : 7回/min
- ② 曲げひずみ量 : 0.05, 0.072, 0.095 及び 0.119 %
(それぞれ曲げ応力 10, 15, 20 及び 25 Kg f/mm²に相当する)

(ロ) 試験板浸漬液条件

- ① 浸漬液組成 : 人工海水(表1.2.2.5参照)
- ② 浸漬液温度 : 常温(室温)
- ③ 浸漬期間 : 曲げひずみ量 0.05 % の時に約 2箇年間、さらに各ひずみ量の時にそれぞれ
3.5 箇月間

(ハ) 試験板素材の成分及び性質 : 表1.2.2.6に示す。

本試験においては、小さいひずみ量から順次大きいひずみ量へと高くしてゆき、この時試験板は同一のものを使用した。また、本試験では一定期間実施後に肉眼観察により、皮膜のきれつなど欠陥の有無を調査した。(表1.2.2.5, 表1.2.2.6)

(ジ) 防食性試験

防食性試験としては以下の3種の試験を行った。

(イ) 屋外暴露試験

JIS K 5400に準拠し、暴露試験を行った。すなわち、造船所の岸壁横に設置した暴露台に試験板を南面30°に保持して取付けた。定期的に皮膜のわれ、はがれ、及びチョーキングなどの度合を観察し、ASTMなどに準じて評価判定した。

(ロ) 天然海水浸漬試験

造船所海域の天然海水中に試験板を浸漬した。皮膜のわれ、はがれ、ふくれ及び発さびなどの有無を定期的に観察し、ASTMなどに準じて評価判定した。

(ハ) 加温人工海水浸漬試験

加熱装置を備えた恒温水槽に人工海水を入れ、液温を40℃に保った中に試験板を浸漬した。試験液中にはエアーポンプにより常温空気を吹き込み、酸素の供給とともに試験液をバーリングして攪拌した。皮膜のわれ、はがれ、ふくれ及び発さびなどの有無を定期的に観察し、ASTMなどに準じて評価判定した。

なお、これらの防食性試験においては、いずれも3箇月ごとに試験板の観察を行った。また、人工海水は6箇月ごとに新しいものと取り替えた。

(オ) 試験板及び単離膜の作製

(ア) 試験板の作製

試験板素材はいずれも熱間圧延鋼板(S S 41)を用い、その形状や寸法は適用した各種の規格に定められたものとした。これらの各種試験項目と試験板の形状・寸法などの関係を表1.2.2.7に示す。また、素材の被覆前処理(素地調整)としては、塗装系仕様の試験板に対してはショットブラスト処理をして無機系シンクプライマーを塗装し、一方、ライニング系仕様のものに対してはサンドブラスト処理を行った。これらの前処理を施した試験板に対し、それぞれ仕様ごとに1日1回の工程で所定の供試材を所定の膜厚で塗り重ねて試験板を作製した。さらに、塗装系塗膜の試験板はエポキシ樹脂塗料を、ライニング系塗膜の試験板はそれぞれのライニング材を用いて周辺部は完全にシールした。

(表1.2.2.7)

(b) 単離膜(フリーフィルム)の作製

強度試験の中で、引張試験用の試験片は単離膜(フリーフィルム)から加工する必要があり、以下のような手法で単離膜を作製した。すなわち、厚さ0.1mmのプラスチックシート(ポリプロピレン製)を両面粘着テープを用いてガラス板に粘着固定し、前述の試験板作製時の場合と同様にそれぞれ仕様ごとに供試材を塗り重ねた。供試材が十分硬化乾燥したのち、プラスチックシートとともにガラス板よりはがし、さらにプラスチックシートをはがして単離膜を得た。なお、塗装系防食仕様の161, 162及び165のように、下塗りに無機シンク塗料を塗装する仕様のものについては、無機シンク塗料膜にわれが発生し、単離膜の作製は不可能であった。

(4) 試験結果とその考察

55年度に試験板を作製し、海水に浸漬したのち、約6箇月経過ごとに試験板を海水から取り出し、皮膜の機械的強さを調査した。また、同時に作製した試験板に対し、屋外暴露、人工海水浸漬及び天然海水浸漬試験を行って防食性についても調査した。4箇年経過時までの各種試験結果を以下に示す。

(a) 曲げ特性

曲げ特性の経時変化を図1.2.2.4(1)及び(2)に示す。

塗装系仕様の中で仕様165の初期のみがきれつ発生までのたわみが非常に大きかったが、これは上塗りしたビニル樹脂塗料の伸展性によるもので、経時とともに低下している。全体的に見ると、きれつ発生までのたわみは4箇年間では大差がないといえる。また、38mmたわみ時のはく離面積については仕様162が経時とともに増加の傾向を示している。

一方、ライニング系仕様はいずれもきれつ発生までのたわみは初期から比較的小さく、経時的にも大きな変化は見られない。しかし38mmたわみ時のはく離面積については、仕様によってかなり差が現われている。すなわち、仕様166は初期にはわずかにはく離が見られたが、海水に浸漬することによって、はく離は見られなくなっている。これは皮膜が吸水し、わずかに軟化したためと思われる。しかし、仕様167及び168は初期からかなりはく離面積が大きく、特に仕様168は経時とともにはく離面積がわずかに増加する傾向にある。(図1.2.2.4)

(b) 衝撃特性

衝撃試験としては直接衝撃及び間接衝撃の両試験を実施したが、直接衝撃試験ではいずれの仕様皮膜ともにわれやはく離は見られず良好であった。従って、間接衝撃についての経時変化を図1.2.2.5に示す。塗装系仕様のうち、仕様162のみが、経時とともにはく離面積が増加している。他の仕様皮膜では初期に比べ、経時変化はほとんどないといえる。

一方、ライニング系仕様はいずれも初期から全くはく離は見られなかった。(図1.2.2.5)

(c) 引張付着特性

引張付着強さの経時変化を図1.2.2.6(1)及び(2)に示す。

塗装系仕様の中で、厚膜無機シンク塗料(1Z)を下塗りした仕様161, 162及び165の引張付着力試験での破断形態はすべて1Z塗膜の凝集破断であり、真の付着強さではないが、破断強さは仕様ごとにわずかに異なっている。また、これら3つの仕様とも、初期に比べ、破断強さは1箇年まではわずかに低下するが、その後ではほとんど変化していない。一方、1Z塗膜のない仕様163及び164では、破断形態はいずれも凝集破断ではあるが、破断強さは経時とともにかなり低下する傾向にある。

また、ライニング系仕様の中で、仕様166及び168は、海水浸漬後1.5箇年まで、経時とともに破断強さはかなり低下する傾向にあり、それ以後はあまり大きな変化はないといえる。この初期から1.5箇年まで経時とともに破断強さが低下した理由としては、吸水による皮膜凝集力の低下によるものと考えられる。一方、仕様167は、初期に比べ、破断強さが経時とともにわずかに増加するが、その後また低下する傾向にある。なお、ライニング系仕様の各皮膜とも、引張付着力試験においてその破断形態はすべて皮膜の凝集破断であったが、但し、仕様167及び168において、ごく一部に素地に近い

凝集破断であり、特に A6.8 で、ごくわずかなさび発生が見られるものがあった。（図 1.2.2.6）

(d) 硬さ特性

皮膜硬さの経時変化を図 1.2.2.7 に示す。

塗装系仕様の各皮膜については、それぞれの硬さにわずかの差は見られるが、いずれも経時的には 4 箇年間ではそれ程大きな変化はないといえる。但し、仕様 A6.2 及び A6.4 のタールエポキシ塗装（T E）の硬さは鉛筆硬度で H であり、他の仕様に比べると最も硬さが小さいといえる。

一方、ライニング系仕様では、いずれも海水浸漬することによって硬さが低下し、特に仕様 A6.6 と A6.7 にその傾向が顕著である。中でも、仕様 A6.7 は経時とともに、硬さが低下している。（図 1.2.2.7）

(e) 単離膜の引張特性

単離膜引張破断強さの経時変化を図 1.2.2.8 に示す。

塗装系仕様の中では仕様 A6.3 及び A6.4 の 2 種のみに対して行ったが、これら両仕様とも初期に比べ、経時とともにわずかに破断強さが大きくなっている。なお、エポキシ系（P E）仕様 A6.3 とタールエポキシ系（T E）仕様 A6.4 とでは、前者が後者より引張強さにおいて約 100 Kgf/cm^2 大きく、経時的にもよく似た傾向を示している。

一方、ライニング系仕様の中では、仕様 A6.6 は初期から引張強さが最も小さく、しかも、海水浸漬することによってさらに低下するが、その後の経時変化は見られない。しかし、仕様 A6.8 では、初期の引張強さは 3 仕様の中で最も大きいが、2 箇年経過まで経時とともにかなり低下し、その後はほぼ一定値を保持している。また、仕様 A6.7 の引張強さは、初期から 4 箇年経過時まで大きな変化はないといえる。（図 1.2.2.8）

(f) 繰返し応力付加特性

繰返し曲げ応力は、板厚 3.2 mm の SS 41 の軟鋼製試験板（図 1.2.2.3 参照）を基準にして、一定のたわみ量を付与したものである。従って、防食仕様やその膜厚がそれぞれ異なる皮膜に対しては、曲げ応力は均一ではないと考えられるが、一応今回の試験においては、軟鋼試験板を基準とした内容で表示することにした。試験結果を図 1.2.2.9 に示す。また、各仕様ごとの特性をまとめて表 1.2.2.8 に示す。これらの図や表から、繰返し応力付加特性については以下のことが考察される。

（図 1.2.2.9、表 1.2.2.8）

応力付加条件として、ひずみ量 0.05 %（曲げ応力 10 Kgf/cm^2 ）で繰返し数 7.10×10^6 回（約 2 箇年間経過）の試験結果では、各仕様ともに皮膜には全く異常は認められなかった。この応力付加条件は、通常の海洋環境において、波浪による外力や波浪の周期に相当するものであり、各仕様ともこの程度の応力付加には十分耐用性を有することが判明した。なお、参考のため図 1.2.2.10 に SS 41 の S-N 曲線を示す。この図から見ると、腐食環境として 3 % 食塩水中における軟鋼では、曲げ応力 10 Kgf/cm^2 の場合、繰返し数が $3 \sim 4 \times 10^6$ 回程度である。これから見ると、各防食仕様とも塗装による鋼材の耐久性向上効果が期待できる。（図 1.2.2.10）

次に応力付加条件として、ひずみ量を順次大きくし、各条件ごとに繰返し数を 1.0×10^6 回以上づつ実施した。その結果、仕様 A6.6 は曲げ応力 15 Kgf/cm^2 で、繰返し数 1.02×10^5 回の時の観察で 20 mm 長さの割れ（クラック）発生が見られたが、同条件で 1.01×10^6 回まで継続しても皮膜の割れはそのままの状態で維持されていた。他の仕様のものは、曲げ応力 10 Kgf/cm^2 で繰返し数 1.0×10^6 回程度では全く異常は認められなかった。曲げ応力 20 Kgf/cm^2 では比較的早い時期に仕様 A6.6 が素材から破断した。また、同条件で、継続したところ、仕様 A6.8 及び A6.5 にそれぞれ繰返し数 8.26×10^5 回及び 1.00×10^6 回の時の観察で皮膜に割れの発生が確認された。

さらに、曲げ応力 25 Kgf/cm^2 に高くしたとき、仕様 A6.5 及び A6.8 は早い時期に素材から破断した。次いで、同条件で繰返し数 1.8×10^5 回の時仕様 A6.7 に割れが発生し、 2.9×10^5 回の時には破断していた。仕様 A6.2 及び A6.4 は曲げ応力 25 Kgf/cm^2 で繰返し数 7.3×10^5 回の時には破断していた。

なお、仕様 $\#1$ 及び $\#3$ は曲げ応力 25Kg f/mm^2 で繰返し数 1.06×10^6 回まで試験したが、両者とも割れなどの皮膜欠陥は認められず良好である。

(g) 防食性能

防食性試験として、屋外暴露試験、天然海水浸漬試験及び 40°C 加温人工海水浸漬試験を実施した。これらの各試験の4箇年経過後における試験板の観察結果を表1.2.2.9に示す。(表1.2.2.9)

いずれの試験においても、また各仕様とも皮膜にわれ、はく離及びさび発生など鋼板素地からの欠陥は全く見られなかった。ただし、屋外暴露試験では、仕様によっては多少の差はあるが、いずれも皮膜表面にチヨーキングが見られた。また、特にガラスフレークの入ったライニング系仕様の $\#7$ 及び $\#8$ では、表面層が劣化消耗し、フレークが露出しているのが観察された。一方、海水浸漬試験では仕様 $\#5$ においてふくれの発生が見られ、これらのふくれはいずれも下塗りであるP E A/Cと中塗Vの層間から生じているものであり、これらの塗り重ねに問題があるものと思われる。また仕様 $\#8$ では表面層の溶解が進み、フレークがかなり脱落しているのが観察された。特に加温海水浸漬試験でこの傾向が著しかった。

なお、臨海浸漬試験用を使って行っている天然海水浸漬試験では、試験板表面に多くの海棲生物の付着が見られたが、観察時には皮膜に傷をつけないように十分注意して付着生物を除去して調査を行った。その結果、いずれの仕様皮膜とも付着生物による損傷(皮膜へのふじつぼなどのくい込みなど)は認められなかった。

(5) まとめ

防食仕様8種に対して実施した各種機械的強度試験や防食性試験の結果から、4箇年経過時までの諸特性を各仕様ごとに要約してまとめる以下とおりである。なお、皮膜の諸特性とその傾向をまとめて表1.2.2.10に示す。(表1.2.2.10)

(a) 防食仕様 $\#1$

仕様 $\#1$ の機械的強度特性をまとめて図1.2.2.11に示す。この仕様は無機シンク塗料の上にエポキシ塗料さらにポリウレタン塗料を塗り重ねたものであるが、4箇年間の機械的強度特性の中で、経時的に変動していると思われる特性は引張付着強さのみである。しかしこの引張付着強さも海水浸漬後1箇年まであり、それ以降はほぼ一定の値を維持していることから、特に付着性の問題はないといえる。その他の諸特性は初期から4箇年までは大きな変化ではなく、没水環境での強度の低下や劣化はほとんどなく、良好な仕様皮膜であるといえる。さらに、海水中において繰返し曲げ応力に耐え、防食性能が良好なことから、本仕様による被覆鋼材の長期耐久性が期待できる。(図1.2.2.11)

(b) 防食仕様 $\#2$

仕様 $\#2$ の機械的強度特性を図1.2.2.12に示す。本仕様は無機シンク塗料とタールエポキシ塗料の組合せ仕様である。曲げによるきれつ発生時のたわみは塗装系仕様の中では最も小さいが4箇年経過時まで経時的には大きな変化はない。しかし 38mm たわみ時はく離面積は海水浸漬後経時とともに増加する傾向にある。これは間接衝撃のはく離面積にも同じ傾向が見られ、いずれも下塗りである無機シンク塗膜の凝集破断である。また引張付着強さに関しても、初期から最も小さく、その破断面はいずれも無機シンク塗膜の凝集破断であった。これらの現象がいずれも無機シンク塗膜から発生していることからみると、本仕様に適用した無機シンク塗膜は特に凝集力の小さいものであり、海水浸漬後は水の浸透により、さらに強度が低下する傾向にあるといえる。ただし、機械的強度が加えられなければ防食性は良好であり、上塗りであるタールエポキシ塗膜は塗装系仕様の中で最も軟かく、鉛筆硬度でH程度であるが、海棲生物による損傷は見られなかった。(図1.2.2.12)

(c) 防食仕様 $\#3$

仕様 $\#3$ の機械的強度特性を図1.2.2.13に示す。この仕様はエポキシ塗料系のみの仕様である。曲げ特性としてのきれつ発生時のたわみは経時とともにわずかに減少し、 38mm たわみ時はく離面

積は海水浸漬後にわずかに見られるようになった。また引張付着力試験における破断形態は経時に関係なく、すべて下塗り A/C 塗膜の凝集破断であるが、引張付着強さは経時とともに低下する傾向にある。皮膜硬さは塗装系仕様の中で最も硬く、鉛筆硬度 3 H 程度であり、その経時変化はほとんど見られない。また単離膜の引張破断強さ及び間接衝撃によるはく離面積についても、初期と 4 箇年経過後では大きな変化はないといえる。さらに仕様 16.1 と同様に、海水中における繰返し曲げ応力に耐え、防食性能も良好なことから、本仕様を適用した鋼構造物は、塗膜に損傷のない限り長期耐久性を有するものと思われる。ただし屋外暴露環境では経時とともにチョーキングが著しく進み、退色面での対策が必要である。（図 1.2.2.13）

(d) 防食仕様 16.4

仕様 16.4 の機械的強度特性を図 1.2.2.14 に示す。本仕様はタールエポキシ塗料のみの仕様である。曲げ特性としてのきれつ発生時のたわみは経時とともにごくわずかに低下するが、38 mm たわみ時のはく離面積はほとんど変化しない。引張付着力試験における破断形態は経時に関係なくすべて皮膜の凝集破断であるが、その強さは経時とともに低下する傾向がある。一方単離膜の引張破断強さは経時とともにわずかに増加する傾向にある。間接衝撃によるはく離面積や皮膜硬さは初期と 4 箇年経過後ではほとんど変化はないといえる。また、無傷の塗膜では防食性は良好であり、仕様 16.2 と同様、ふじっぽなど付着生物による損傷は見られない。（図 1.2.2.14）

(e) 防食仕様 16.5

仕様 16.5 の機械的強度特性を図 1.2.2.15 に示す。この仕様は無機シンク塗料にエポキシ塗料を塗り重ね、さらに上塗りにビニル塗料を塗装したものである。曲げ特性としては、初期におけるきれつ発生時のたわみは 38 mm 以上であったが、経時とともに低下している。一方 38 mm たわみ時のはく離面積は、1 箇年経過後から見られその後はほぼ同程度で見られている。引張付着力試験における破断形態は、仕様 16.1 及び 16.2 の場合と同様、経時に関係なくすべて無機シンク塗膜の凝集破断であり、その強さは経時とともに低下している。上塗りしたビニル塗膜の硬さは 1 箇年経過後においてごくわずかに硬くなっているが、曲げ特性におけるきれつ発生時のたわみが低下したことからも判断すると、ビニル塗膜が経時とともにわずかに硬くなり、そのため伸展性が低下したものと思われる。また、海水浸漬試験において 2 箇年経過時にふくれが見られ、経時とともにふくれがわずかに大きくなったり、中にはふくれが破れているものもあった。このふくれはエポキシ塗膜 (PE・A/C) とビニル塗膜 (V) の層間から発生しており、塗り重ね性に多少問題のある組合せであると思われる。（図 1.2.2.15）

(f) 防食仕様 16.6

仕様 16.6 の機械的強度特性を図 1.2.2.16 に示す。本仕様は特に厚膜型のエポキシレジンモルタルライニング (PEM) であり、1 回で仕上げるタイプである。曲げ特性としてのきれつ発生時のたわみは初期から 4 箇年経過時までほとんど変化していない。また、38 mm たわみ時のはく離面積は初期にはわずかに見られたが、海水浸漬後においては全く見られていない。さらに間接衝撃においてもクラックのみで、はく離面積は 4 箇年経過後も全く見られない。一方、引張付着力試験における破断形態は初期からすべて皮膜の凝集破断であるが、その強さは 2 箇年経過時まで経時とともにかなり低下するが、その後はほぼ一定の値で維持している。また皮膜硬さも 2 箇年経過時までわずかに低下しており、さらに単離膜の引張破断強さも海水浸漬前後で半減し、その後はほぼ一定の値を保持している。繰返し応力付加試験においても、曲げ応力 $10 \text{ Kg}_f/\text{mm}$ では繰返し数 7.1×10^6 回までは問題がなかったが、曲げ応力を $15 \text{ Kg}_f/\text{mm}$ に高くすると、8 種の仕様の中で最も早く皮膜にクラックが発生し、曲げ応力 $20 \text{ Kg}_f/\text{mm}$ では耐えられず、短時間で素材から破断した。

以上のことから本仕様は海水に浸漬することによって若干軟化し、しかも凝集力の低下が起こる。しかし、鋼板素材との付着性は良好であり、わずかの曲げや衝撃によって皮膜にクラックが生じるが、はく離することはない。また厚膜のため $15 \text{ Kg}_f/\text{mm}$ 程度の繰返し曲げ応力に耐えることができず

ラックが発生するが、この厚膜であることが加味されて、海中没水環境においては防食性能に優れた仕様であるといえる。（図1.2.2.16）

(g) 防食仕様167

仕様167の機械的強度特性を図1.2.2.17に示す。本仕様はガラスフレーク入りエポキシライニング（PEF）を塗り重ねて厚膜にするものである。曲げによるきれつ発生時のたわみは初期と4箇年経過時まではほとんど変化しない。また38mmたわみ時のく離面積は初期からかなり大きく4箇年経過時においても同程度のはく離面積である。引張付着力試験の破断形態はすべて凝集破断であり、経時とともにわずかに強さは増加するが、2.5箇年後からは低下する傾向にある。また、皮膜硬さは経時とともに低下し、3種のライニング系仕様の中で最も軟い皮膜である。しかし、単離膜の引張破断強さは経時とともにわずかに増加する傾向にある。なお、防食性能は良好であり、大きく変形しない構造物に対しては長期耐久性があるといえる。（図1.2.2.17）

(h) 防食仕様168

仕様168の機械的強度特性を図1.2.2.18に示す。この仕様は仕様167と同様、ガラスフレーク入りポリエステルライニング（ESF）を塗り重ねる仕様である。曲げ特性としてのきれつ発生時のたわみは仕様皮膜の中で最も小さく、初期から4箇年経過後も大きな変化はない。しかし38mmたわみ時のく離面積は初期から最も大きく、しかも経時とともに増加する傾向がある。引張付着力試験での破断はすべて凝集破断であるが、その強さは1.5箇年経過時まで大きく低下し、その後はほぼ一定の値を保持しているといえる。皮膜硬さは3種のライニング系仕様の中で最も硬いが、経時とともにわずかに低下する傾向がある。また、単離膜の引張破断強さは、初期には非常に大きかったが2箇年経過時まで経時とともに大きく低下し、その後はほぼ一定の値になっている。海水浸漬後、ふくれやさび発生は見られないが、皮膜表面層が海水に溶解し、ガラスフレークが露出してくる。また、引張付着力試験や曲げ試験において、はく離した素地にはごくわずかに点さびが発生している場合もあり、皮膜を通して水分が透過したとも考えられ、防食性能面では多少の問題があるといえる。

（図1.2.2.18）

（参考）本研究に準用した規格の種類と名称

- 1) J I S G 3 4 9 2 水道用鋼管コールタールエナメル塗覆装方法
- 2) J I S A 6 9 0 9 合成樹脂エマルジョン砂壁状吹付材
- 3) J I S K 5 4 0 0 塗料一般試験方法
- 4) A S T M D 2 5 8 3 INDENTATION HARDNESS OF RIGID PLASTICS BY MEANS OF A BARCOL IMPRESSOR
- 5) J I S K 6 7 3 4 硬質塩化ビニルシート及びフィルム
- 6) J I S K 7 1 1 3 プラスチックの引張試験方法

表1.2.2.1 供試材料(塗料)の性状

塗料系統 (略号) 供試材料	無機シンク塗料 (IZ)			エボキシ樹脂塗料 (PE)			タールエボキシ樹脂塗料 (TIE)			ビニル樹脂塗料 (V)			ポリウレタン 樹脂塗料 (PU)
	①	②	③	① (PE・A/C)	② (PE・中塗)	③ (PE・T/S)	④ (PE・A/C)	①	② (V・中塗)	③ (V・T/S)	④ (V・T/S)		
(1) 色相	レディッシュグレイ	グレイ	グレイ	シルバー	白	白	赤さび	黒	黄	白	白		
(2) 比重(塗料)	2.65	2.64	2.5	1.28	1.28	1.28	1.42	1.20	1.36	1.13	1.29		
(3) 粘度(at 20°C)	CP 320	30~80 秒	55	P 9	P 8.2	P 8.2	KU 9.0	P 2.5	KU 8.0~10.2	KU 7.2~7.8	KU 4.5	P	
(4) 不揮発分[wt %]	8.5	8.1	8.2	6.8	6.2	6.2	6.3	7.6	6.0	4.24	6.8		
(5) 混合割合[wt比] (主剤):(硬化剤)	(液):(粉) 3.0:7.0	(液):(粉) 2.5:7.5	(液):(粉) 2.9:7.1	60:10	60:10	50:10	68:10	85:15	—	—	—	50:10	
(6) 可使用時間(at 20°C)	6 h	8 h	6 h	8 h	8 h	8 h	8 h	7 h	—	—	—	4 h	
(7) 塗布量[gr/m ²]	3.57	3.30	3.54	2.40	1.18	1.18	2.30	4.50	3.52	1.18	8.5		
(8) 膜厚[μm]	dry 125	wet 125	75 125	75 148	100 220	40 90	40 91	60 162	250 373	100 260	30 105	35 70	
(9) 乾燥時間 (at 20°C)	指触 2 h	10 min	30 min	2 h	3 h	1 h	3 h	2 h	2 h	10 min	1 h		
(10) 適用した塗装系の% 16.1	16.2	16.5	16.3	16.1	16.1	16.3	16.5	16.4	16.5	16.5	16.1		
(11) 備考													

表1.2.2.2 供試材料(ライニング材料)の性状

項目 供試材料 (略号)	エポキシモルタル ライニング (P E M)	エポキシガラスフレーク ライニング (P E F)	ポリエステルガラスフレーク ライニング (E S F)
(1) 色 相	オリーブグリーン	グ レ イ	グ レ イ
(2) 比重(混合物)	1.37	1.20	1.20
(3) 粘 度	790 (20 rpm)	650 (20 rpm)	150 (12 rpm)
(4) 不揮発分 [wt%]	91	92.6	95
(5) 混合割合 [wt比]	(主剤) : (硬化剤) 100 : 50	(主剤) : (硬化剤) 82.5 : 17.5	(主剤) : (硬化剤) : (促進剤) 100 : 1 : 0.125
(6) 可使時間 (at 20°C)	1.5 h	2 h	4 h
(7) 塗 布 量	1.4 kg/m ² /mm	840 gr/m ²	965 gr/m ²
(8) 膜 厚 [mm] <i>dry</i> <i>net</i>	3~5 3.3~5.5	0.625 0.665	0.75 0.805
(9) 乾燥時間 (at 20°C)	指触	5 h	4 h
	硬 化	12 h	16 h
(10) 塗り重ね間隔 (at 20°C)	最 短	24 h	16 h
	最 長	7 日	4 日
(11) 備 考	防食仕様 A6	防食仕様 A7	防食仕様 A8

表1.2.2.4 繰返し応力付加試験装置の仕様

項 目	仕 様
① 電 源	220 ^v × 60 HZ
② 試験板の寸法	3.2 ^t × 100 × 310 mm (図1.1.2 参照)
③ 試験板取付数	6枚 × 2列 = 12枚
④ ストローク寸法	±30 mm
⑤ ストローク回数	1~10回/min (無段变速)
⑥ 繰返し数積算カウンター	7桁 (10 ⁷)
⑦ 試験水槽の材質	SUS 304
⑧ 試験装置寸法	600 ^w × 1,000 ^h × 2,700 ^l mm

表1.2.2.3 防食仕様

系統	防食仕様 No.	素地調整	s/p	材 料 と 直 回 数					() 内膜厚: μ_m	合計膜厚 [μ_m]	備 考
				1回目	2回目	3回目	4回目	5回目			
塗装系	1	Sh	IZP (75)	ミストコート	PE・A/C (100)	PE・A/C (100)	PE・(中塗) (40)	PU・T/S (35)	350		
	2	Sh	IZP (75)	ミストコート	TE (250)	—	—	—	—	325	
	3	Sh	IZP (100)	PE・A/C (100)	PE・A/C (100)	PE・A/C (100)	PE・T/S (40)	PE・T/S (40)	—	380	
	4	Sh	IZP (200)	TE (200)	—	—	—	—	—	400	
	5	Sh	IZP (75)	ミストコート	PE・A/C (100)	PE・(中塗) (60)	V・T/S (40)	—	—	275	
	6	Sd	— (5000)	PEM	—	—	—	—	—	5000	
	7	Sd	— (650)	PEF	—	—	—	—	—	1300	
	8	Sd	— (750)	ESF	ESF (750)	—	—	—	—	1500	
(注) 1. () 内は膜厚 μ_m を示す。 2. 塗り重ね間隔はいずれも 1 日間 (1 day 1 coat) である。 3. ミストコートはいずれも 3 回目上塗料を専用シンナーで希釈したものを利用した。											

表1.2.2.5 人工海水調合組成

成 分	化 学 式	配 合 割 合
塩化ナトリウム	NaCl	375.00 g
塩化マグネシウム	MgCl ₂ · 4H ₂ O	150.00 g
硫酸ナトリウム	NaSO ₄ · 10H ₂ O	142.50 g
塩化カルシウム	CaCl ₂ · 2H ₂ O	22.50 g
塩化カリウム	KCl	9.00 g
ヨウ化カリウム	KI	0.75 g
水	H ₂ O	15.0 ℥

表1.2.2.6 試験板鋼材の成分と性質

化 学 成 分					機 械 的 性 質		
C	Si	Mn	P	S	引張強さ (kgf/mm ²)	降伏点 (kgf/mm ²)	伸び (%)
0.15	0.02	0.50	0.006	0.011	40.5	27	39

(注) 使用した試験板の厚さは3.2mm

表1.2.2.7 試験項目と試験板の寸法

試 験 項 目	試験板の寸法(mm)	備 考
(a) 曲 げ 試 験	1.6 ^t × 100 × 300	JIS G 3492に準拠
(b) 衝 撃 試 験	3.2 ^t × 300 × 300	JIS G 3492に準拠
(c) 引 張 付 着 力 試 験	3.2 ^t × 100 × 300	付着力試験時に約40×40mmの寸法に切断加工する。
(d) 硬 さ 試 験	(特に専用の試験板) は作製しない	曲げ試験あるいは衝撃試験などの試験板を用いて試験する。
(e) 引 張 試 験	(単離膜を作製して) ダンベル状に加工	プラスチックシート(100×175mm)面に塗覆した状態で暴露や浸漬試験に供し、試験時に所定の形状に加工する。(図1.2.2.1参照)
(f) 繰返し応力付加試験	3.2 ^t × 100 × 310	(図1.2.2.3参照)
(g) 食 性 試 験	(i) 屋外暴露試験	3.2 ^t × 100 × 300
	(ii) 天然海水 浸漬試験	3.2 ^t × 100 × 300
	(iii) 加温人工海水 浸漬試験	3.2 ^t × 100 × 300

表1.2.2.8 繰返し応力付加試験における各仕様の耐久性

防食 仕様/ 膜厚 [mm]	皮膜にクラックが発生した時期	素材から破断した時期		クラック発生の順位	(備考) 曲げ試験※ きれつ発生時のたわみ(mm)	
		曲げ応力 [kgf/mm]	繰返し数 [回]			
塗装系仕様	1 0.41	—	—	—	—	20
	2 0.45	—	—	25	7.3×10^5	6 15
	3 0.41	—	—	—	—	20
	4 0.51	25	6.5×10^5	25	7.3×10^5	5 22
	5 0.4	20	1.0×10^6	25	1.4×10^5	3 21
ライニング系仕様	6 4.7~5.0	15	1.0×10^5	20	1.1×10^5	1 16
	7 0.95~1.2	25	1.8×10^5	25	2.6×10^5	4 15
	8 1.4~1.7	20	8.3×10^5	25	1.5×10^5	2 9

- (注) (1) ※曲げ試験のきれつ発生時のたわみ (mm) は、浸漬 2 箇年経過時の値を示す。(参考値)
(2) 棚内 — は試験板観察時において確認されなかったことを示す。
(3) クラック発生時期及び破断した時期の曲げ応力及び繰返し数は、それ以前の曲げ応力と繰返し数を行った同一試験板である。(図1.2.2.9 参照)

表1.2.2.9 防食性試験 4 箇年経過後の皮膜状態

試験方法 仕様/ 膜厚	屋外暴露試験 (大阪堺造船所岸壁)	天然海水浸漬試験 (大阪堺造船所近海の試験用筏)	加温海水浸漬試験 (40℃加温の人工海水)
塗装系仕様	1 チョーキング(中)	良 好	良 好 (わずかに黄色に変色)
	2 チョーキング(中)	良 好	良 好
	3 チョーキング(多)	良 好	良 好 (わずかに黄色に変色)
	4 チョーキング(中)	良 好	良 好
	5 チョーキング(中)	ふくれ 6F~6M (PEA/CとV(中間)の層間から)	ふくれ 8F, 表面わずかに黄色変色 (PEA/CとV(中間)の層間から)
ライニング系仕様	6 チョーキング(多) (白っぽくなる)	変色, つや消失のみ	変色, つや消失のみ
	7 チョーキング(多) (フレークが露出)	良 好	良 好
	8 チョーキング(多) (フレークが露出)	表面層溶解(フレーク露出)	表面層溶解著しい

- (注) (1) 防食仕様/A5のふくれはASTM D 714にて評価した。
(2) 天然海水浸漬試験の試験板観察は皮膜面に付着した海棲生物を注意深く除去して行った。

表1.2.2.10 防食仕様皮膜の諸特性とその傾向(4箇年経過時まで)

調査項目と 調査内容		曲げ特性	衝撃特性	引張付着特性	硬さ特性	単離膜引張特性	
防食 仕様	きれいに発生時のたわみ (mm)	38mmたわみ時の はく離面積 (cm ²)	間接衝撃による はく離面積 (cm ²)	引張付着強さ (kgf/cm ²)	破断面形態 (4箇年後)	鉛筆硬度 はバーコル硬度	引張破断強さ (kgf/cm ²)
塗装系仕様	1 2.0 → 2.0	1.9 ↗ 1.8	0.4 → 0.4	2.5 → 1.8	IZ凝集破断	1.5H → H	
	2 1.6 → 1.4	2.7 ↗ 4.0	0.8 ↗ 1.6	1.7 → 1.1	IZ 同上	H → H	
	3 2.5 → 1.9	2 ↗ 5	0.2 → 0.3	4.5 ↗ 1.9	皮膜凝集破断	3H → 2.5H	2.20 → 2.50
	4 2.5 → 2.2	0 → 2	0.2 → 0.2	4.1 ↗ 2.5	同上	H → H	1.15 → 1.50
	5 3.8 < 1.7	0 ↗ 1.1	0.25 → 0.3	2.7 → 2.2	IZ凝集破断	1.5H → H	
	6 1.7 → 1.6	6 ↗ 0	0 → 0	7.8 ↗ 5.9	皮膜凝集破断	4.0 ↗ 2.2	8.0 → 5.0
	7 1.6 → 1.5	3.8 ↗ 3.8	0 → 0	5.0 ↗ 5.8	皮膜凝集破断 と一部界面破断	2.2 ↗ 6	3.20 → 3.40
	8 1.1 → 8	4.2 ↗ 4.9	0 → 0	4.6 ↗ 3.2	皮膜凝集破断 と一部界面破断	5.0 ↗ 4.3	4.60 → 3.15

(注) (1) 表中各欄の数値は、左側は初期値、右側は4箇年経過時の値を示す。

(2) 表中の矢印は初期値に対する△；増加、→；ほぼ同程度、↗；低下(減少)などの傾向を示す。

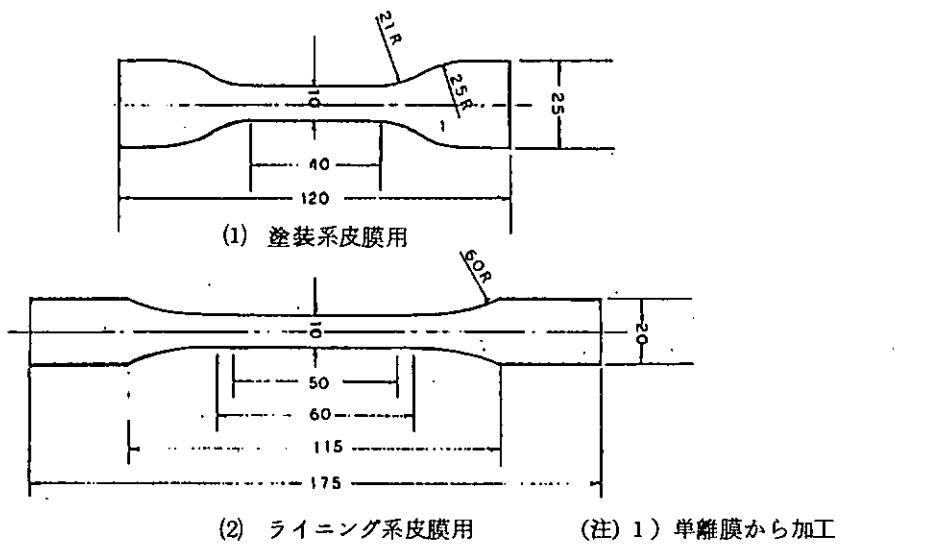


図 1.2.2.1 引張試験用試験片の形状・寸法

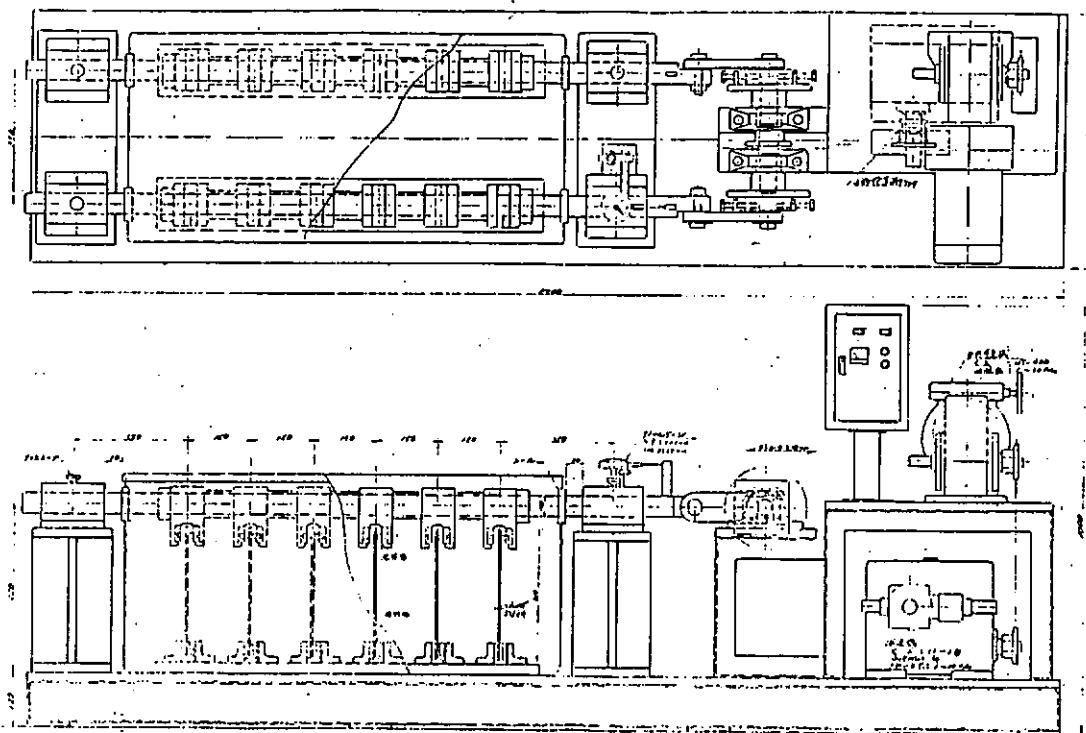


図 1.2.2.2 繰返し応力付加試験装置の組立図

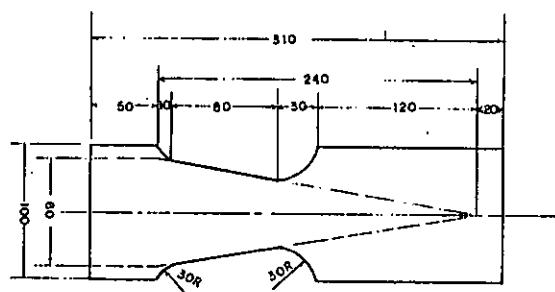


図 1.2.2.3 繰返し応力付加試験用試験板の形状・寸法

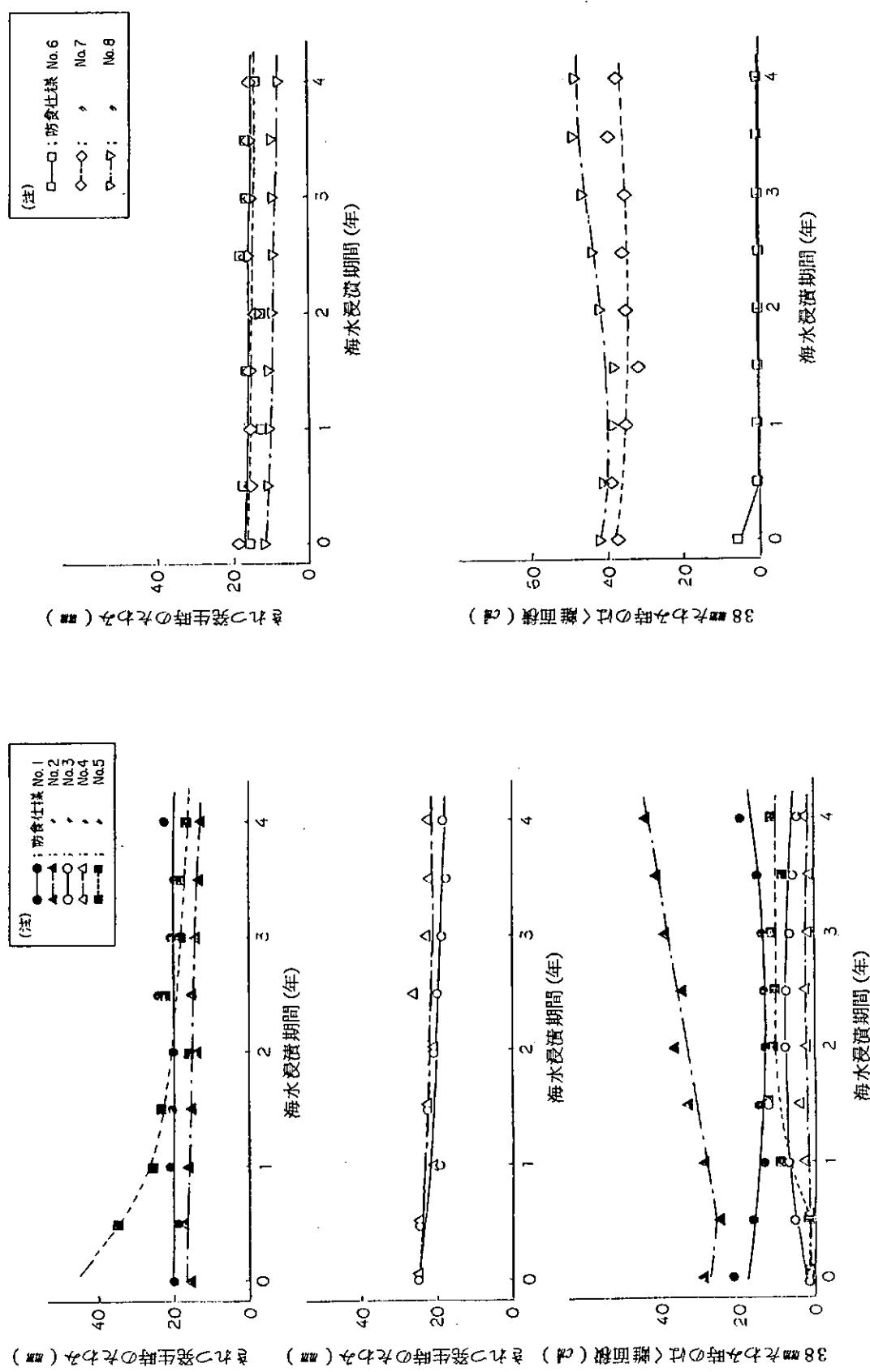


図 1.2.2.4(1) 曲げ特性の経時変化（塗装系仕様）

図 1.2.2.4(2) 曲げ特性の経時変化（ライニング系仕様）

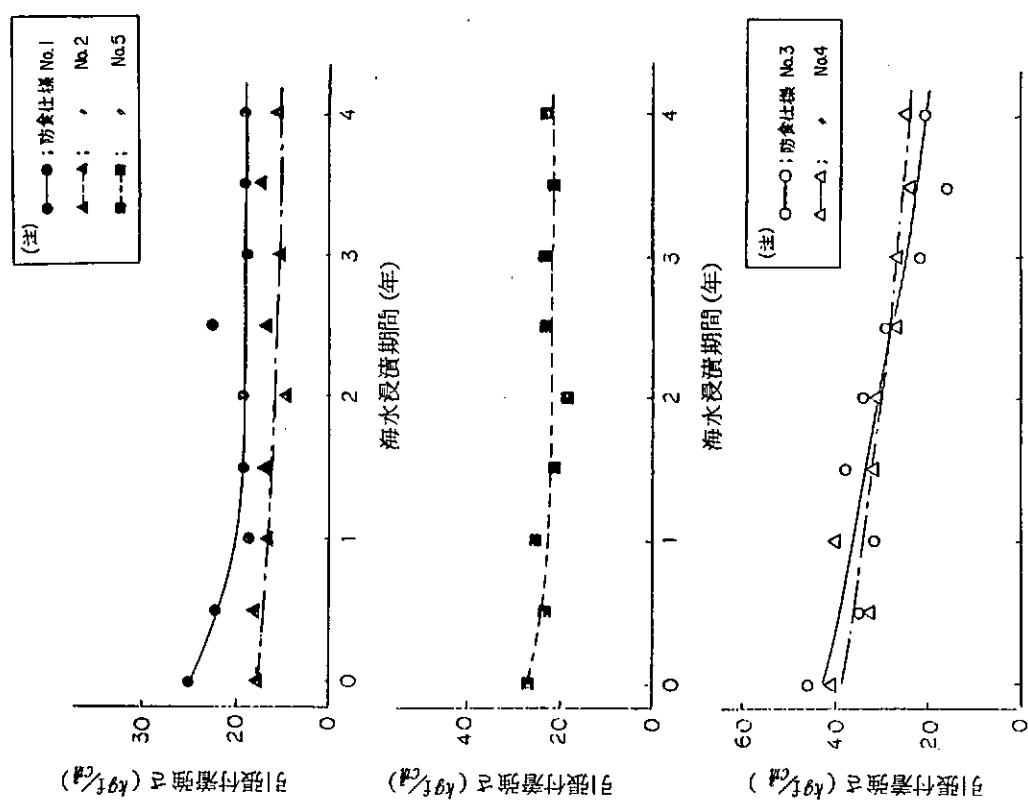


図 1.2.2.6(1) 引張付着強さの経時変化(塗装系仕様)

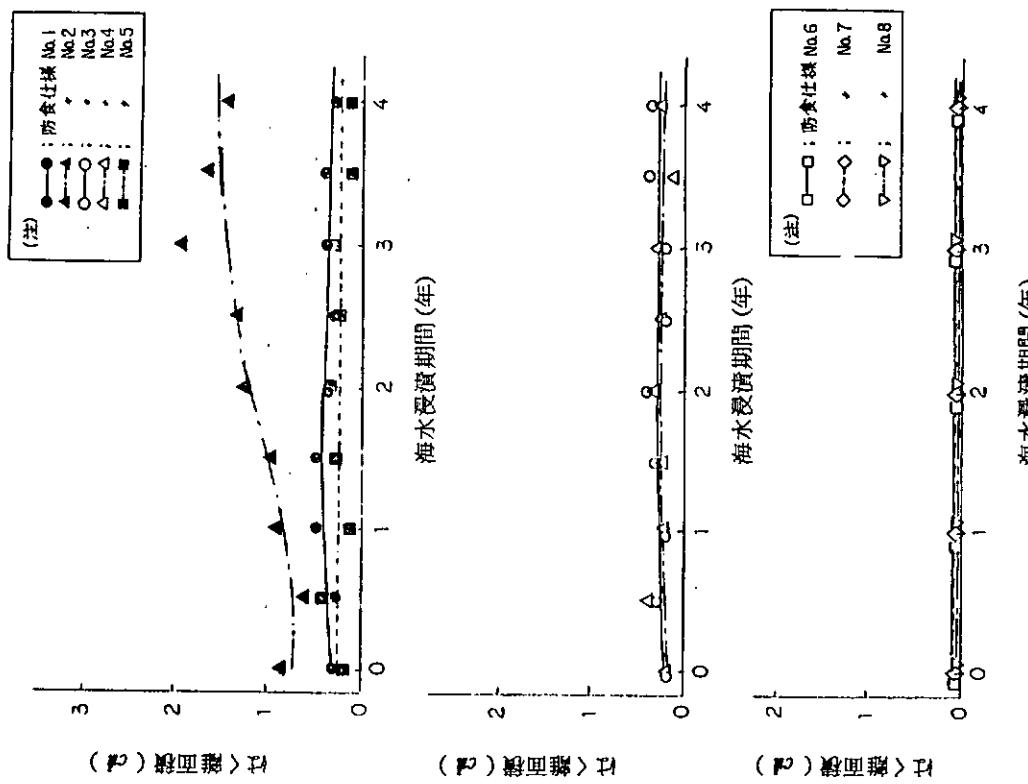


図 1.2.2.5 衝撃特性(間接衝撃)の経時変化

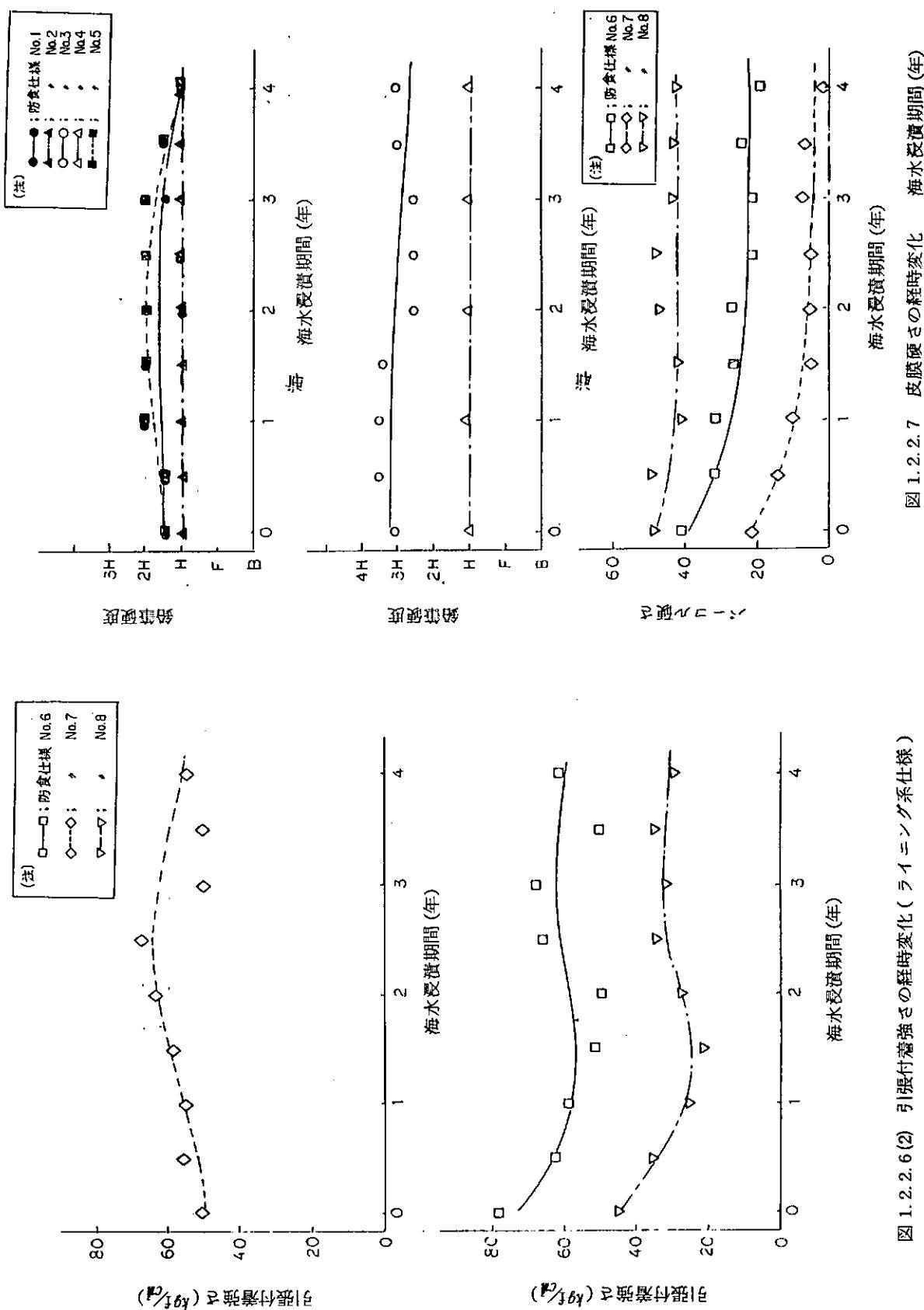


図 1.2.2.6(2) 引張付着強さの経時変化(ライニング系仕様)

図 1.2.2.7 皮膜硬さの経時変化 海水浸漬期間(年)

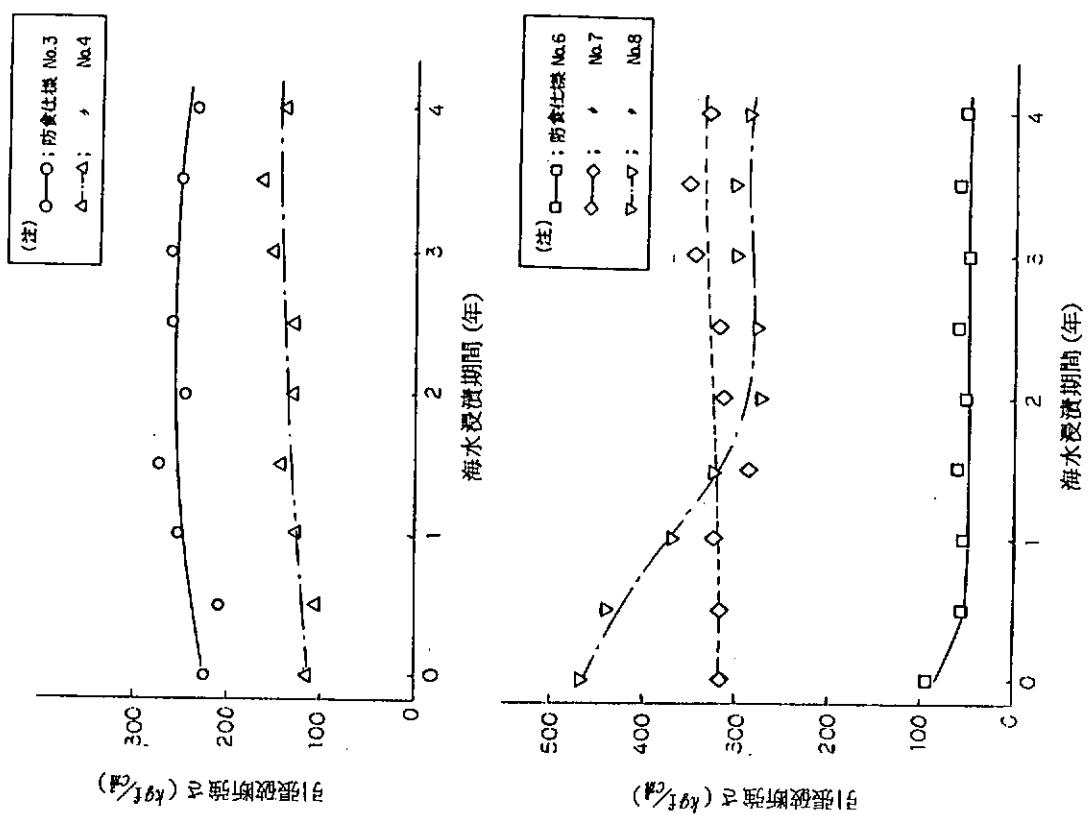


図 1.2.2.8 単離膜引張破断強さの経時変化

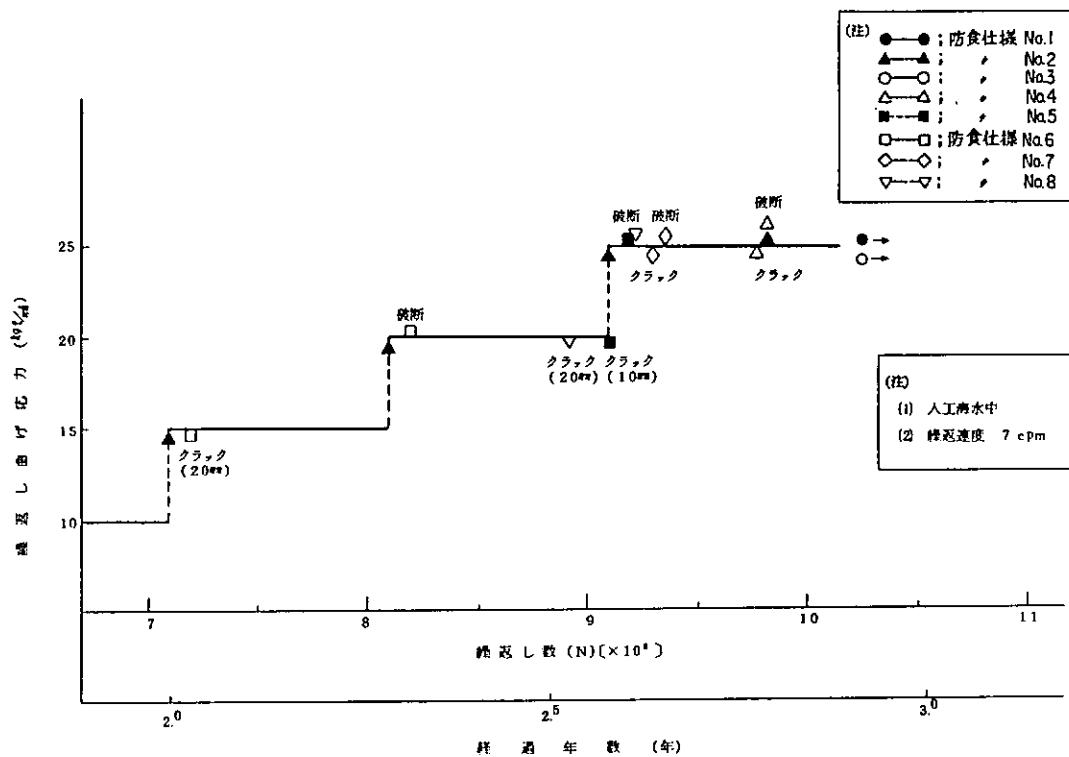


図 1.2.2.9 繰返し応力付加試験結果

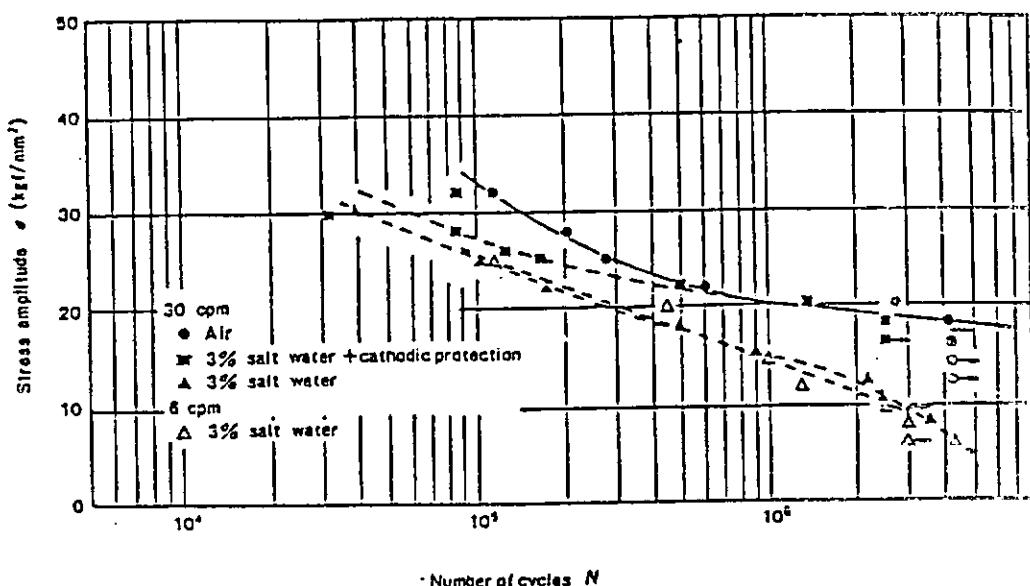
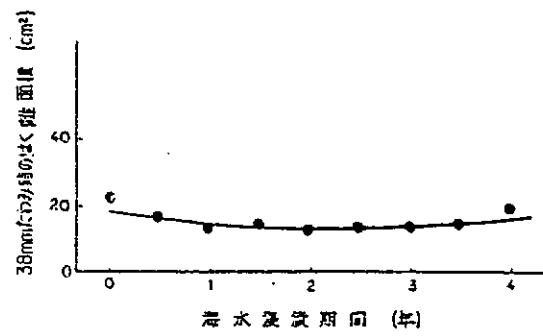
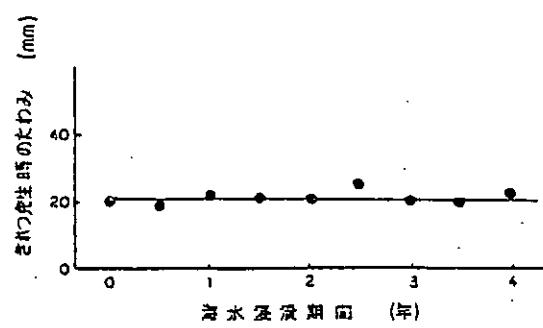
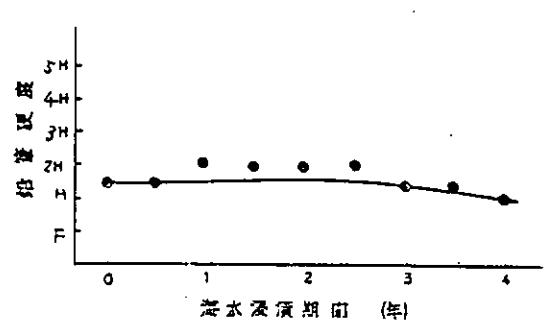


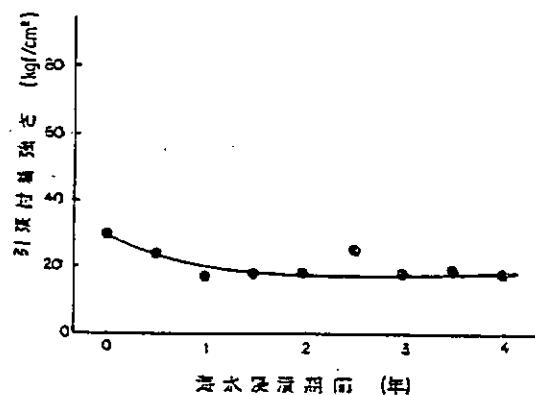
図 1.2.2.10 S-N curves of SS 41(As-roll)



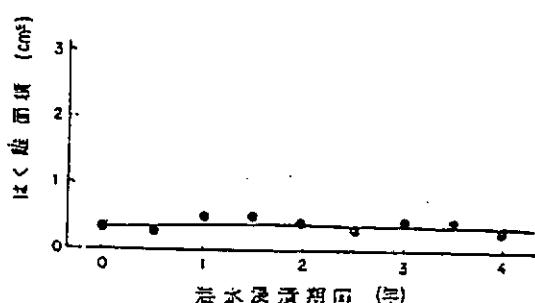
(1) 曲げ特性の経時変化



(3) 皮膚厚さの経時変化

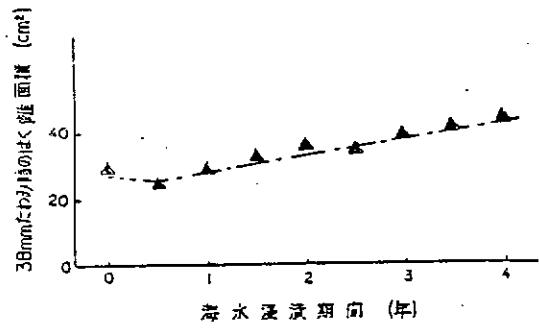
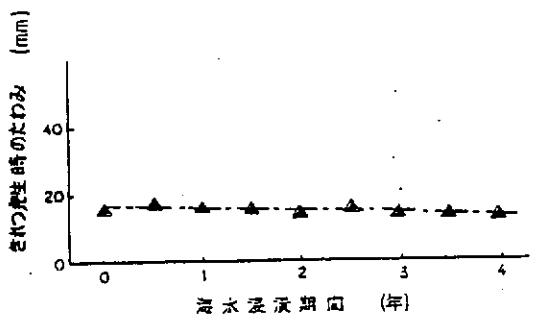


(4) 引張付着強さの経時変化

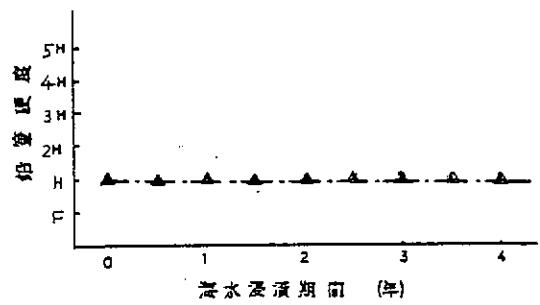


(2) 衝撃特性(同様衝撃)の経時変化

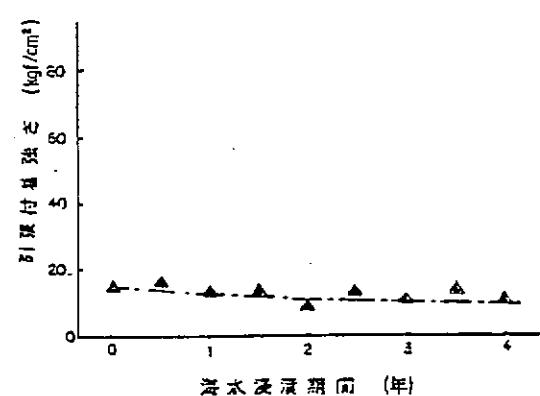
図 1.2.2.11 防食仕様No.1 の機械的強度特性



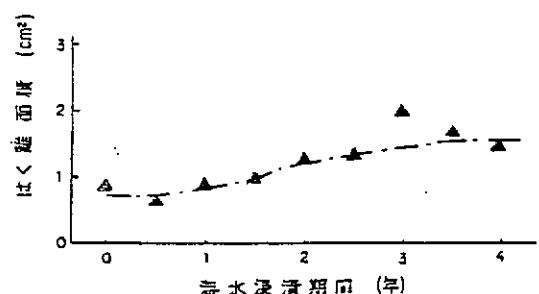
(1) 曲げ特性の経時変化



(3) 皮膚厚さの経時変化

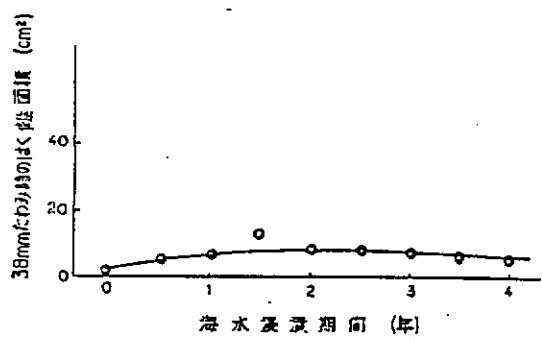
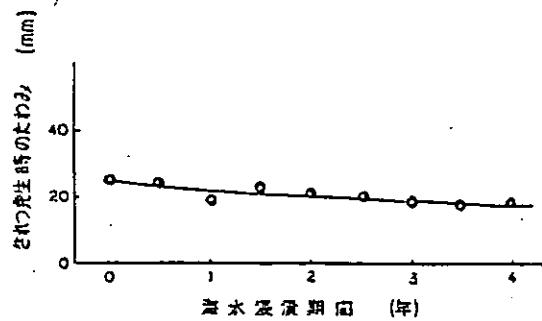


(4) 引張付着強さの経時変化

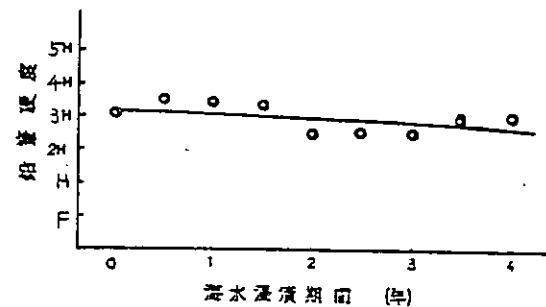


(2) 衝撃特性(向接衝撃)の経時変化

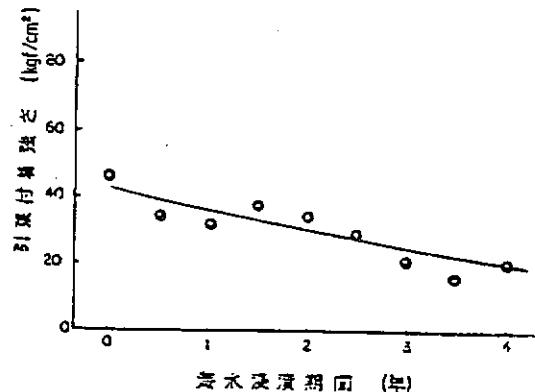
図 1.2.2.12 防食仕様No.2 の機械的強度特性



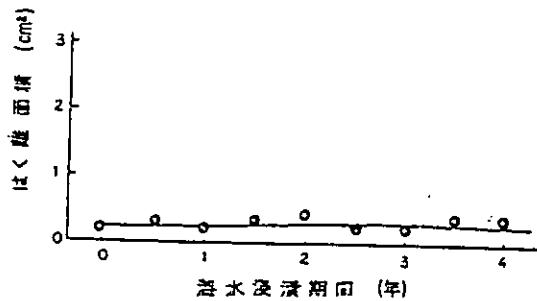
(1) 曲げ特性の経時変化



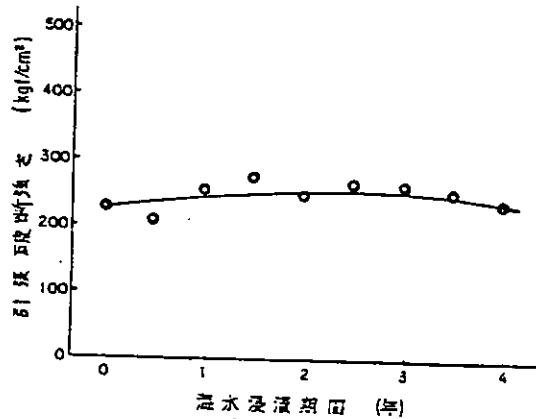
(3) 反復せんさの経時変化



(4) 引張付着強さの経時変化

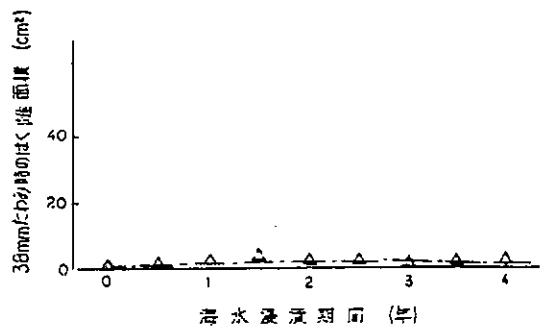
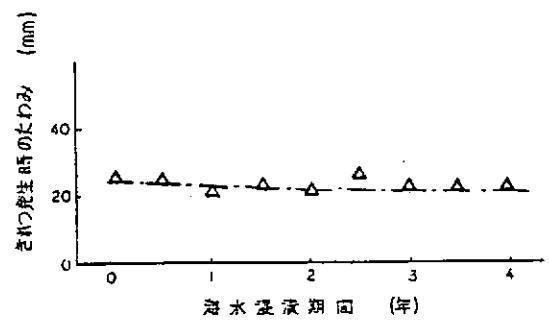


(2) 衝撃特性(直接衝撃)の経時変化

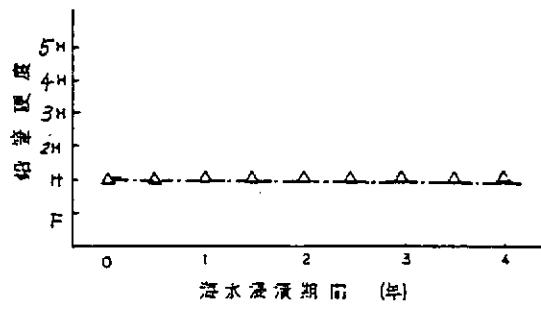


(5) 單離剥離強度の経時変化

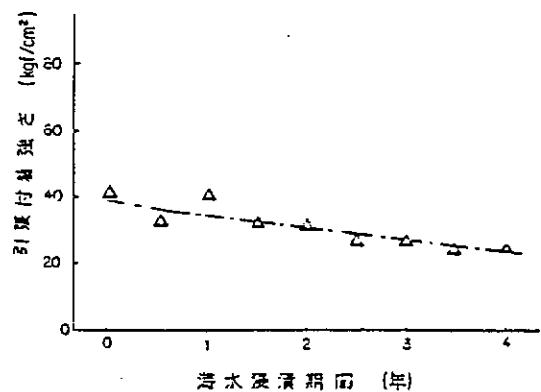
図 1.2.2.13 防食仕様No.3の機械的強度特性



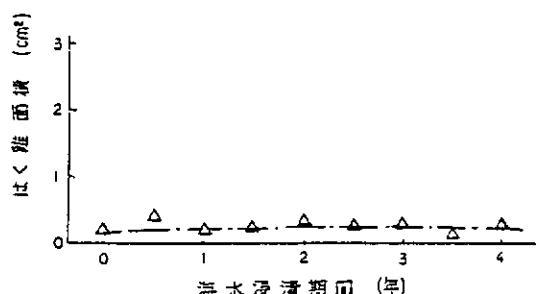
(1) 曲げ特性の経時変化



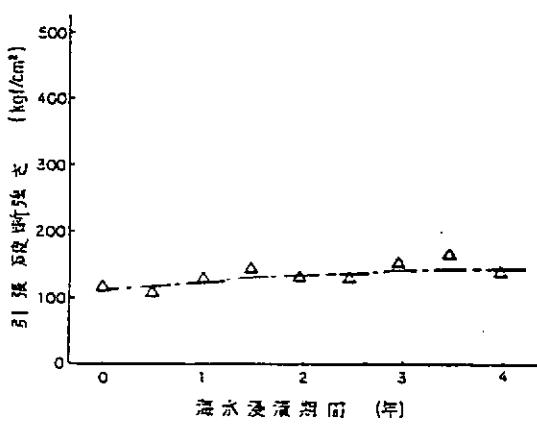
(3) 表面軟化の経時変化



(4) 引張付着強さの経時変化

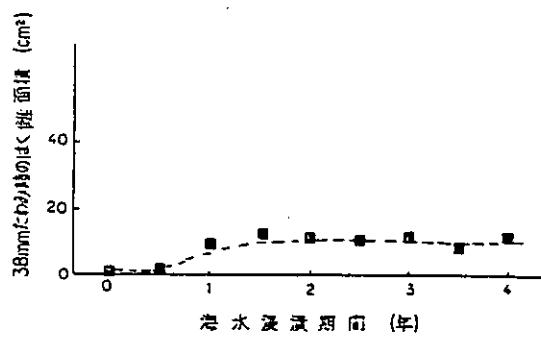
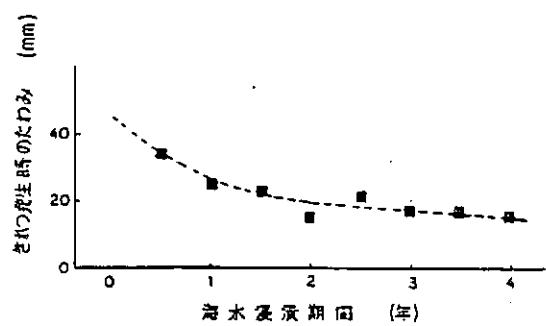


(2) 衝撃特性(直接衝撃)の経時変化

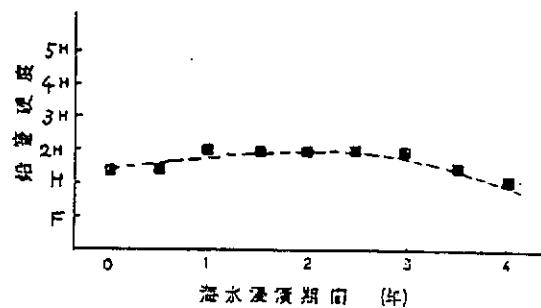


(5) 単層引張破断強さの経時変化

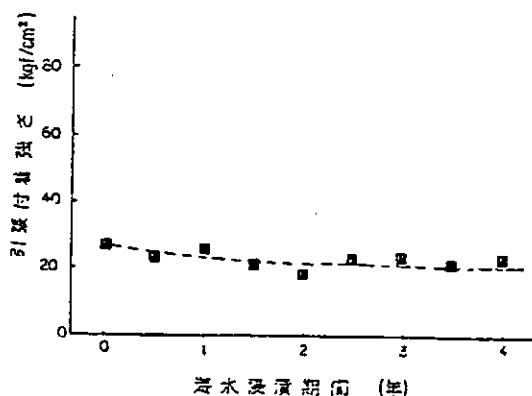
図 1.2.2.14 防食仕様No.4の機械的強度特性



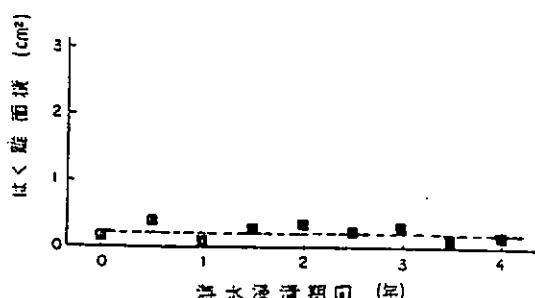
(1) 曲げ特性の経時変化



(3) 皮膜厚さの経時変化

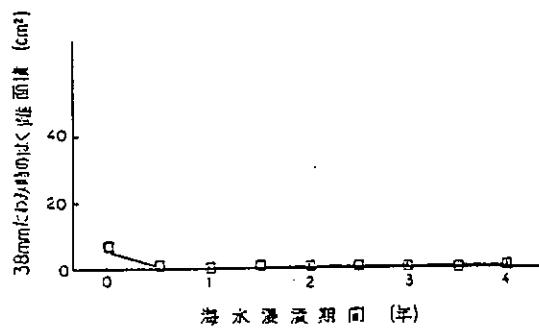
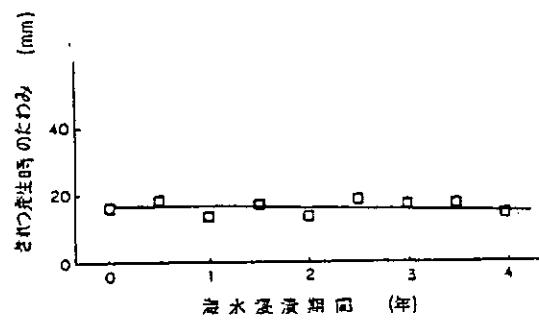


(4) 引張付着強さの経時変化

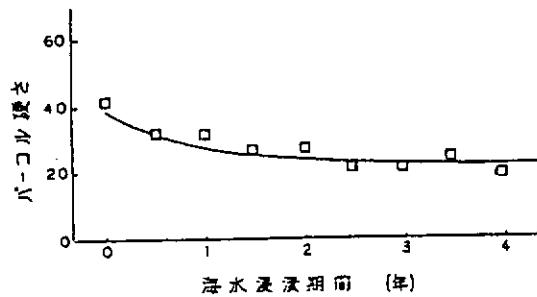


(2) 衝撃特性(衝撃衝撃)の経時変化

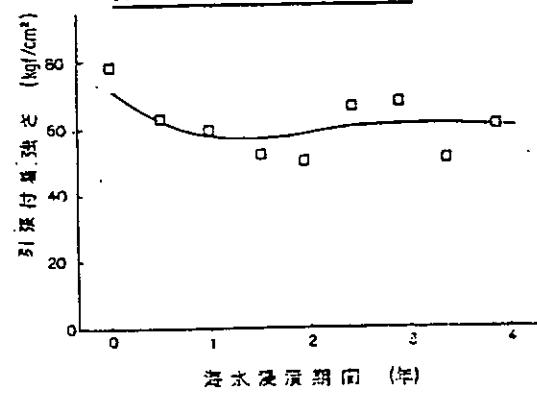
図 1.2.2.15 防食仕様No.5の機械的強度特性



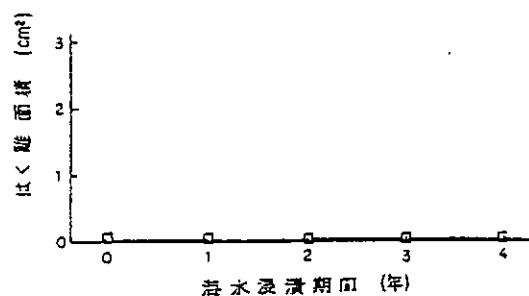
(1) 曲げ特性の経時変化



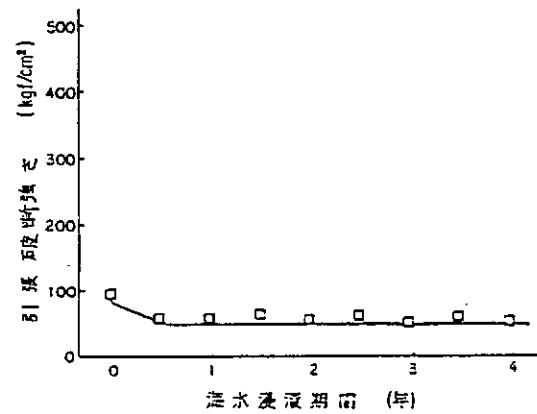
(3) 皮膜強さの経時変化



(4) 引張付着強さの経時変化

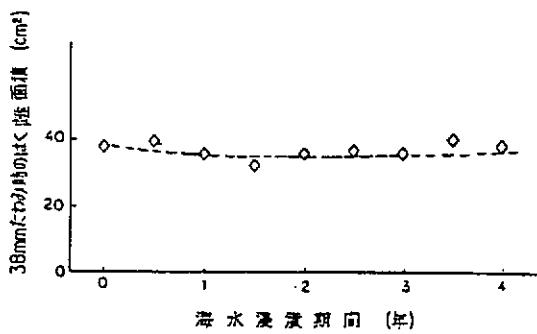
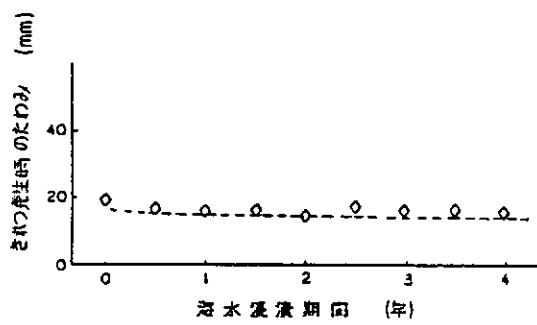


(2) 剥離特性(面積面積)の経時変化

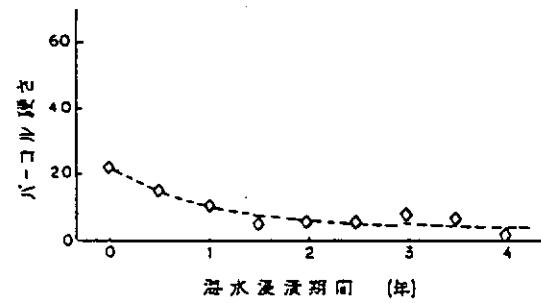


(5) 単離膜引張破断強さの経時変化

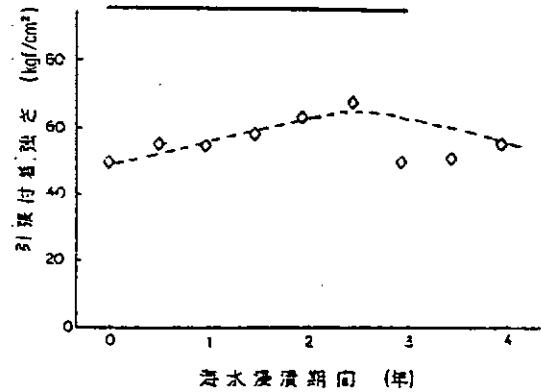
図 1.2.2.16 防食仕様No. 6 の機械的強度特性



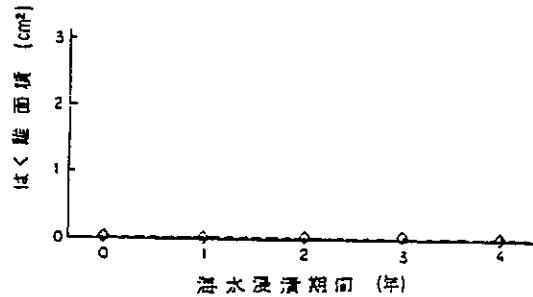
(1) 曲げ特性の経時変化



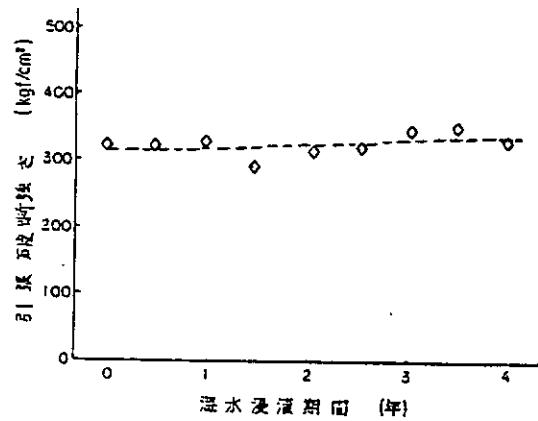
(3) 皮膜厚さの経時変化



(4) 引張付着強さの経時変化

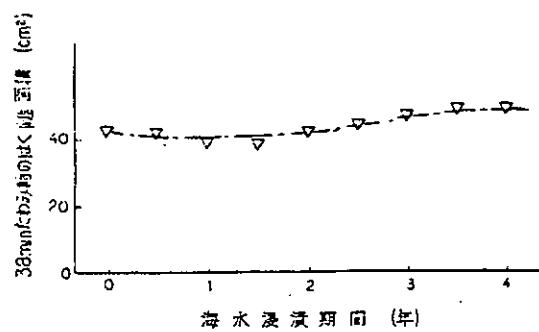
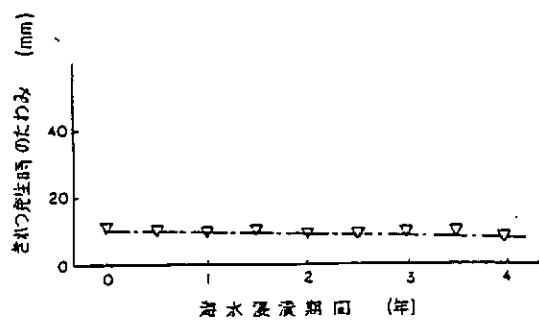


(2) 衝撃特性(直接衝撃)の経時変化

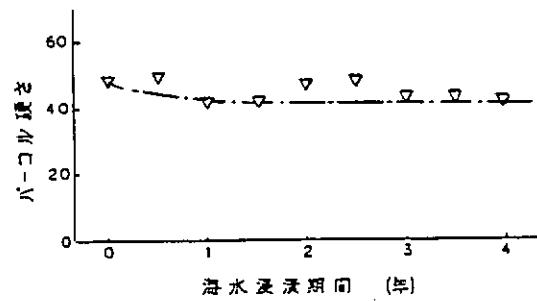


(5) 崩壊引張破壊強さの経時変化

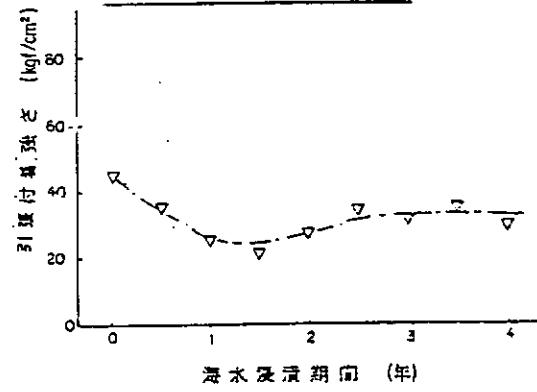
図 1.2.2.17 防食仕様No.7の機械的強度特性



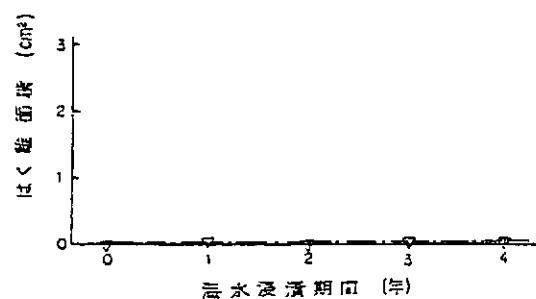
(1) 曲げ特性の経時変化



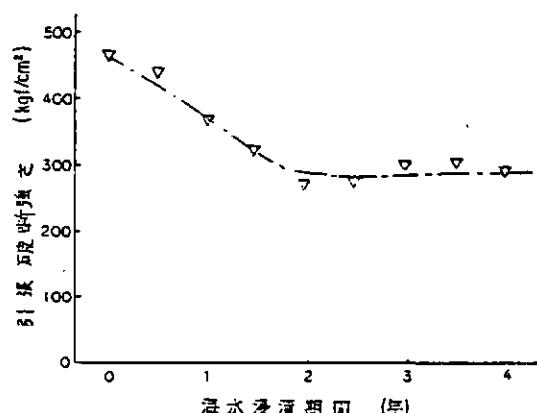
(3) 皮膚厚さの経時変化



(4) 引張付着強さの経時変化



(2) 衝撃特性(両接衝撃)の経時変化



(5) 単離試引張破壊強さの経時変化

図 1.2.2.18 防食仕様No.8 の機械的強度特性

1.3 金属防食材料及び数種防食法の併用効果に関する調査（55年度実施）

海洋構造物に使用される部材は海洋の激しい腐食環境下での使用と海上におけるメンテナンス技術の制約から構造物の長期維持には、時として耐食性金属材料単独又は金属防食材料による被覆（犠牲鉄板巻き、耐食性低合金鋼、耐食性高合金材料、高合金、クラッド鋼）等による防食法が行われるが今回の調査は今後の海洋環境下での防食性の指針となる資料を得るために実施したものであり、SR182部会メンバーによるアンケート方式の解答結果と科学技術文献速報などから文献資料（1970～1980）を抜粋し、まとめたものである。

1.3.1 金属防食材料のアンケート結果

海洋構造物防食用としての各種金属材料の調査に関する回答は、16社（防食材料メーカ 10社と鉄鋼又は造船会社 6社）中2社と極めて少なかった。これらの詳細については55年度報告書（研究資料No 341号）を参照願いたい。

1.3.2 数種防食法の併用効果に関するアンケート結果

海洋構造物防食仕様としての数種防食法の併用効果に関するアンケートの回答は、16社中から得たものであり、文献等では調査し難い新規性がある。これらの詳細についても55年度報告書（研究資料No 341号）を参照願いたい。

1.3.3 文献調査

海洋開発に関連した海洋構造物（船舶も含む）の海上大気部、飛沫部、海中部などの防食性を対象に、金属防食材料単独あるいは有機被覆による防食効果、金属皮膜と有機皮膜併用効果、有機皮膜と電気防食併用効果等に関する文献調査を行った。その結果を分類してみると以下のようになる。なお、これらの文献の題目等については、研究資料No 341号を参照願いたい。

- (1) 腐食関係文献…………… 212 報
- (2) 電気防食と塗装の併用文献…………… 58 報

2. 海洋環境下での構造物の防食性試験

2.1 防食性試験の目的

海洋構造物での防食仕様は、実験室試験と実績の結果から選定されるが、新材料による実績評価が得られるためには、少なくとも数十年の経過を必要とする。

海洋構造物の設置される環境は一般的に苛酷で、構造物に施工した被覆材の劣化現象を詳細に把握することは容易でない。

本研究は、現地環境の条件を再現することは無理にしても、これに近くしかもデータの入手が容易な環境を国内沿岸に求め、この地に海洋構造物のモデル構造物を係留し、施工した各種防食被覆材の劣化を調査することによって、実環境の詳細データを取得するとともに実験室試験と実環境での相関性を把握するために実施した。

2.2 浮体試験体の概要及び設置場所

2.2.1 浮体試験体の概要

(1) 浮体試験体の構造

浮体試験体の寸法を図2.1に示す。

- (a) 尺 法 横幅 1500 × 縦幅 5000 × 高さ 4000 mm の浮体 2 基からなる双胴形試験体
- (b) 脊 間 外径 318.5 mm φ × 長さ 6000 mm 鋼管 5 本で接続。
- (c) 双胴の上面デッキ部を摺動可能なエキスパンションメタルで接続し、波高・波長によって鋼管に応力が発生する。
- (d) 脊内に海水バラストをすることによって、浮体の水位が調整できる。
- (e) 重 量 試験体 17.5 トン
係留用チェーン 1" もの 100 m × 2 本 2.4 トン
1" もの 50 m × 2 本 1.2 トン
係留用シンカー 8 m³ × 4 個 7.4 トン

(図2.1)

(2) 防食被覆材の仕様

浮体式試験体の各部位に施工した防食仕様を表2.1に示す。

- (a) 海中部・飛沫部には最も実績が多い塗装系 2 種、ライニング系 5 種を適用した。ライニング系のうち 1 種は実績が多い PEM、あと 4 種は PE, ES, TE のガラスフレーク材である。
- (b) 洋上大気部に施工した 7 種は汎用形の塗装系である。
- (c) 浮体内部には、ケレン低減形と汎用形の TE を施工し、底部から 1.5 m 高さまでは海水を張水するため、電気防食のみの施工とした。
- (d) デッキの手摺は亜鉛めっきのため、亜鉛めっき用の塗装仕様を適用した。
- (e) いずれの仕様も、デッキ手摺を除き無機シンクのショッププライマを鋼板素材の段階で塗装したのち、本塗装の時点で規定の二次表面処理を行っている。
- (f) 本研究においては、期間中の経時変化は破壊調査を併用するため長さ 3000 mm の L 形鋼に表2.1 海中部・飛沫部を対象の塗装系、ライニング系の合計 7 種を本体と同様の処理方法及び条件で施工し、この試験片は長さ方向を浮体本体の側面に取付けた。
- (g) 浮体本体と試験片を区別するため、下記のように呼称する。
浮体本体 ; 浮体本体被覆材
試験片 ; 試験片被覆材

(表2.1)

2.2.2 試験体の設置場所

船舶の航行に支障がなく、構造物の管理が容易な場所を探した結果下記の場所を選定した。

長崎県西彼杵郡香焼町沿岸（北緯 $32^{\circ}42'10.5''$ 東経 $129^{\circ}49'10''$ ）

三菱重工業㈱ 長崎造船所

香焼工場西側海域（図2.1.5 参照）

海岸から 50 m 冲 水深約 20 m

2.3 防食性調査

浮体式試験体には、昭和 56 年 8 月～10 月に防食施工後、11 月に現地に係留し、試験片被覆材は年 1 回の調査、浮体本体被覆材については、3 年目のみ調査を行った結果をとりまとめた。

2.3.1 浮体本体被覆材の 3 篤年経過後の調査

(1) 全般についての外観評価

海中部・飛沫部、洋上大気部及び応力発生部の結果を表 2.2 に示す。

(a) 海水に全没部（海中部）は、多くの海洋生物が付着、応力が発生する鋼管の海面側には、小量の海洋生物が付着した。生物付着による被覆材への損傷は認められない。

(b) 海中部について、TE 塗装系 2 種のみ、ごく一部でさびが見かけられ（評価基準で最低面積率 0.03% より以下）、塗装系仕様 No.4 が塗装系仕様 No.2 よりも欠陥がやゝ多い。

原因是、施工時及び今回調査のため生物除去時の損傷によるものと考えられ、特に TE のみの仕様 No.4 の塗装では膜厚 400 μm といえども、メインテナンスフリーの点では安全とはいえないようである。

(c) 応力発生部の被覆材については、外観及び打診法による被覆材の浮き上りなどの現象は認められず、良好である。

新造時に膜厚が不足したため塗り増した仕様 No.2 について層間はく離が発生した。（表 2.2）

(2) 海中部・飛沫被覆材

(a) 海洋生物の付着

海洋生物の付着量及び付着厚みを図 2.2 に示す。

(i) 被覆材の種類による顕著な差はなく、空気中湿重量で $4 \sim 7 \text{ kg}/0.25 \text{ m}^2$ ($16 \sim 28 \text{ kg}/\text{m}^2$) が付着した。

(ii) 付着厚みは $30 \sim 150 \text{ mm}$ で被覆材による顕著な差はない。

(iii) 生物の種類はちごけむし、赤ふじつぼ、ほや、からす貝、セルプラの順で、厚みに大幅な差異があるのは、こけむしの付着にばらつきが多いためである。

(iv) これら生物を除去した後の被覆材の表面は仕様 No.2 及び No.4 を除き全く損傷はない。仕様 No.2 及び No.4 では、ごく一部例ええば、エッジ部やさび発生部の近傍の塗膜が鋼板素地面からはく離した。

(b) 付着力、インピーダンス

海中部、水線部及び飛沫部の付着強度とインピーダンス（電気容量、界面抵抗、 $\tan \delta$ ）の結果を図 2.3 に示す。

(i) 仕様 No.6 の PEM の付着力は相対的に低いが、付着強度としては良好な範囲にある。

(ii) 仕様 No.8 の ESF は海中部の付着強度のみ低く、はく離の形態は凝集破壊で、海水中での脆化のための低下である。このライニング材は海水中で溶解減耗の傾向がある。

(iii) 他はいずれも付着強度が高く、各部位の影響による差もない。

(iv) $\tan \delta$ は $0.1 \sim 0.3$ の範囲内にあって、表面の外観では欠陥はほとんどなく良い。仕様 No.2 で $\tan \delta$ が高い箇所があるが、この部分は浮体の外洋側の水線部であり、この部位にはふくれが見られた。

(V) 塗装系、ライニング系いずれも $\tan \delta$ 0.2~0.3程度では劣化現象が察知できる数値ではなく、重防食用被覆材の劣化が認められる $\tan \delta$ の数値は高いようである。

(3) 洋上大気部被覆材

付着力及び塗面のチョーキング(白亜化)を図2.4に、インピーダンスを図2.5に示す。

- (a) 付着力は、3種の塗装系はいずれも鋼板素地とのはがれではなく、高い付着力を示し、浮体の部位の影響もみられない。
- (b) 塗面のチョーキングは仕様M1がよく、仕様M3は著しく、仕様M5は仕様M1とM3の中間程度にある。
- (c) チョーキングの評価は、ASTM法によった。
- (d) インピーダンス(C.R. $\tan \delta$)の結果からは塗膜の電気化学的劣化は、認められない。

(図2.4、図2.5)

(4) タンク内部及びデッキ部被覆材

付着力、さび・ふくれ、塗膜のインピーダンス及びタンク内海水バラスト部の電気防食における陽極材の平均防食電流密度を表2.3に示す。

(表2.3)

- (a) タンク内空槽部の塗装系2種(仕様M3及びM4)は、いずれもエッジ部にさびを生じており、一般部は良好である。
- (b) 同上塗装系の付着力も良好で、はく離テスト部のはがれ状態の観察からは、仕様M4塗装系の付着力がやや優れているようである。
- (c) 同上塗装系のインピーダンスは良好な範囲内にあって、高湿空槽部での塗膜劣化の傾向は全く見かけられない。
- (d) タンク内海水バラスト部(S/P塗装鋼板)防食電流密度は小さく、ショッププライマーのIZPの影響によるものである。
- (e) デッキ手摺(亜沿めっき鋼管)の塗装系仕様M5は、チョーキング(白亜化)は認められるが、さび・ふくれは全くなく、付着性(2mm目基盤目)も良好である。

2.3.2 浮体応力部被覆材の3箇年経過後の調査

本研究では、浮体製作時に図2.6に示す位置に計測器(ストレンゲージ、加速度計、熱電対)を設置し、期間中の応力(ひずみ)と劣化の関係を調査した。

(図2.6)

(1) 応力測定方法

現地環境2年目で図2.7に示す計測装置系により集中的に関係データを取得し、現地の風速・波高・応力(ひずみ)の関係データ¹⁾から、現地の風速のみを測定することによって3箇年の応力頻度を推定する間接法によって応力を算出した。

(図2.7)

(2) 繰返しひずみ回数

風速→浮体の動揺→浮体間接続管ひずみ(μ)→ひずみ率(%)によって推定した、繰返しひずみ回数を表2.4に示す。

- (a) 応力が発生した頻度は3箇年間で 2.0×10^7 回であり、4.7秒に1回の割合で応力を生じ、これは波の波数(約5秒に1回)とほぼ一致している。
- (b) 期間中最高のひずみ率はパイプ上面及び下面の200μのひずみが 3×10^4 回程度で、頻度としては0.1%に過ぎない。
- (c) パイプ側面の応力は、上面や下面の約1/3程度である。

(表2.4)

(3) 応力部ひずみと、付着力・インピーダンス($\tan \delta$)の関係

図2.8は応力発生部(鋼管の上面、側面、下面)の付着力及び $\tan \delta$ の測定結果を示す。

- (a) 応力発生の部位による付着力についての顕著な差はなく、いずれも良好な数値であるが、傾向的に

は厚膜であるライニング系で応力が高い上面、下面の数値がやや低い。

- (b) インピーダンスの結果も良好であるが、ライニング系仕様 $\#8$ の $\tan \delta$ がやや高く、他の試験結果と同傾向を示した。

(図 2.8)

2.3.3 試験片被覆材の経年変化(海中部)

浮体試験体の側面海中部及び飛沫部に取付けた試験片(長さ 3,000 mm の L型試験片)は毎年 1 回取りはずして、下記に示す調査を行った。

(1) 外観

海洋生物の付着を図 2.9 に、生物除去後の被覆材表面観察結果を表 2.5 に示す。

(a) 生物付着

- (i) 試験片の場合は、浮体本体の生物付着(3箇年間の累積)と異なり、毎年生物を除去して調査後に再度取付けている。したがって、図 2.9 は 1 年目を省略し、2 年目(57 年 11 月～58 年 10 月)と 3 年目(58 年 11 月～59 年 8 月)の記録である。
- (ii) 試験片のうち仕様 $\#2$ と $\#4$ のものは期間中に海底に落下(ダイバーにより回収)したため、調査が不十分である。
- (iii) 生物の付着量は 2 年目と 3 年目に期間の相違があり、2 年目が多く、3 年目は前年 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$ と極めて少ない。被覆材の種類による差異は顕著でなかった。(浮体本体に同じ)
- (iv) 付着厚みは、2 年目で 3～7 cm、3 年目は最高 2.5 cm と少ない。
- (v) 生物の種類は赤ふじつぼ、からす貝、セルプラ、ほや類で浮体本体のような 3 節年間の累積でない。

- (b) 生物除去後の被覆材表面は、仕様 $\#6$ の PEM が補修部の一部層間に離を生じているのみで、各被覆材とも異常は認められない。

浮体本体の仕様 $\#2$ 及び $\#4$ の塗装系にごく一部にさび・ふくれが生じた現象は試験片では生じていない。

(図 2.9、表 2.5)

(2) 付着力強度

図 2.10 に付着力の経年変化を示す。

- (a) 塗装系仕様 $\#2$ 及び $\#4$ は経年とともに付着力が向上する傾向にあり、ライニング系仕様 $\#8$ は浮体本体(海中部)と同様に付着力が低い。
- (b) 付着力が低いライニング系仕様 $\#6$ 及び $\#8$ でも数値は一応満足できる範囲内にあって、鋼板素地面からのはく離の傾向は認められない。強制的にはがした仕様 $\#6$ 及び $\#8$ の鋼板素地面には、薄い点さびが生じており、浮体本体ではこのような現象はなかった。

(図 2.10)

(3) インピーダンス

図 2.11 に電気容量(C)、界面抵抗(R)、 $\tan \delta$ の経年変化を示す。

- (a) 異常な傾向を示したのは、ライニング系の仕様 $\#6$ と $\#8$ で、他と比較し、 $\tan \delta$ 平均値が 1.2 あるいは 0.8 と高く、通常この程度の数値は塗膜に何らかの異常が認められるものであるが、これら被覆材の外観は表 2.4 でも述べたように良好である。しかしながら、図 2.10 に示した付着力が比較的に低い。これらについては長期間のフォーロによって原因を調べる必要がある。
- (b) 他の塗装系仕様 $\#2$ 及び $\#4$ の 3 年目の $\tan \delta$ が突出しているものもあり、これらは浮体本体(海中部)で確認されたような、ごく一部の塗膜欠陥と関係あるものと推定されるが、外観からは確認できていない。

(図 2.11)

(4) 海水中の塩分の浸透

塗装系 2 種、ライニング系 5 種の海中部試験片について、塩分(Cl^-)の浸透を X 線マイクロアナライザ(XMA)によって調べ、代表例としてスペクトルを図 2.12 に、 Cl^- の浸透深さ(1 年目、2 年目、

3年目の結果から3年目をポイントしたもの)の経時変化予想線を図2.1.3に示した。

- (a) 塩分の浸透が最も早いのは仕様No.6のPEMで、以下仕様No.7(PEF), 仕様No.8(ESF), 仕様No.2(TE)の順序であり、浸透速度の予想線としては、 λ_2 勾配による経年浸透が推定される。
- (b) 図2.1.4にライニング系皮膜の断面図を示したが、骨材である顔料の形状が塩分の浸透に影響しているようであり、フレーク系といえども、断面からみる膜の構成は異なっている。
- (c) この測定結果では材料によってばらつきの大きいものがあり、微小な測定面であるため、膜の構成あるいは測定用テストピースの調製によるばらつきが原因と考えられる。
- (d) ライニング系仕様No.8では数値は低いが、図2.1.2のスペクトル中、厚みが減少しており($1,400\mu\text{m} \rightarrow 1,200\mu\text{m}$)これは表層の減耗によるものと考えられる。
- (e) 図2.1.2で仕様No.8(ESF)塗膜の中間に Cl^- が検出されているが、これは被覆材ESFの1stコート後の養生時(暴露期間2.5日)の塩分付着によるものと推定される。
- (f) これら塩分の浸透速度から被覆材の耐久寿命の足がかりが得られるとすれば、今後もさらに追跡することによって、寿命予測の精度向上が考えられる。 (図2.1.2, 図2.1.3, 図2.1.4)

2.3.4 気象・海象の調査

実環境試験の参考資料として、当地域の海象及び気象測定点を図2.1.5に示した。図2.1.6は長崎海洋気象台による気象のデータ、図2.1.7は同気象台の長崎港周辺の波高減衰比率表である。図2.1.8は同地域の海水温度と比重を示したものである。

- (1) 実環境への設置は昭和56年11月で、昭和59年8月末に調査のため、浮体試験体を上架した。
- (2) 期間中の気象での特記事項としては昭和57年7月に長崎地方の大水害があり、このため、図2.1.6の雨量が多い。
- (3) 平均風速及び風向もほぼ一定しており、浮体試験体を係留している場所の場合は南西方向からの風が波高に影響するため、浮体試験体の動搖も大となる。(図2.1.5, 図2.1.6, 図2.1.7, 図2.1.8)

2.4 考 察

2.4.1 実環境浮体の一般部と実験室結果との関係

いずれの試験でも劣化の傾向が未だ把握されていないため、十分な考察はできないが、付着力測定結果のみについては、次の通りである。

- (1) 図2.1.9は、実験室での海水浸漬4箇年間の経時グラフに実環境に設置した浮体試験体3年目の結果をプロットしたものである。
なお、浮体の塗装仕様No.1.3.5は大気暴露部であり、実験室試験は海水浸漬であり、条件は同じでない。
- (2) 塗装系仕様(図2.1.9(1))は、実環境浮体の付着力が高く、数値の絶対値のみの比較による評価が適正でないことを示した。
本測定での実験室結果は引張付着力試験(速度5mm/min)であり、一方実環境浮体の付着力測定はアドヒージョンテスターによるものである。
- (3) ライニング系仕(図2.1.9(2))では塗装系仕様の結果と異なり、測定値が近似しており、数値の絶対値での評価も可能のようである。
- (4) 塗装系仕様での実験室データと実環境データの顕著な差異は、測定方法も含めて、評価方法及び数値についての詳細な検討が必要である。 (図2.1.9(1), (2))

2.4.2 繰返し応力について

(1) 実験室試験と実環境浮体との関係

- (a) 表 2.6 は実環境モデル試験体応力発生部の高応力部位の結果と実験室結果(ダンベル型試験片)を示した。
- (b) 実験室での付加応力と比較すれば、実環境試験体での応力は低く、 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{6}$ 程度であり、そのため被覆材の劣化現象はない。
- (c) 実験室では 10 kgf/mm^2 (ひずみ 0.05 %), 15 kgf/mm^2 (0.071 %), 20 kgf/mm^2 (0.092 %), 25 kgf/mm^2 (0.119 %) と低応力から高応力へ同一試験片を段階的に増加させている。
- (d) 本試験の繰返しインターバルは、実環境分は 4.7 秒に 1 回の応力、実験室分は 8.6 秒に 1 回の応力であり、実環境分の応力インターバルが約 2 倍速い。
(表 2.6)

(2) 浮体試験体に生じた繰返しひずみと実機に生ずるひずみの関係

- (a) 表 2.4 に示した応力部(下面)と実機との関係を図 2.20 に示した。
- (b) 実機に生ずるひずみを議論する場合、通常「累積頻度分布」^{*)}で示すが、図に斜線で浮体に生じた繰返しひずみ範囲は累積頻度分布を示す。
- (c) 図で黒丸は表 2.4 におけるひずみ範囲、たとえば $(180 \sim 210) \times 10^{-6}$ の上限 $(210) \times 10^{-6}$ で示した分布で、白丸は下限 $(180) \times 10^{-6}$ で示した分布である。浮体は斜線範囲の繰返しひずみを受けた事になる。
- (d) 海洋構造物の設計は、使用する海域により、その海域の海象データをもとに、100年間で想定される最大のストームでプレース(円筒)の一般部(除応力集中部)で降伏応力(ひずみ)……軟鋼で 0.114% ひずみを越えぬ事、及び想定される繰返しひずみ(20年)で局部(応力集中部)が疲労損傷をしない事が規定されている。
- (e) 実機における構造の局部の疲労破壊の規定は、たとえば A.B (アメリカ船級協会)で用いる線図は図中に示すようである。一般に局部は応力集中(2～3程度)があり、一般的平行部(プレース円筒部)は局部の $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{3}$ の繰返しひずみをうけている。浮体試験体のひずみ計図位置は一般的平行部に相当する。
- (f) 実機の一般的平行部はその位置により生ずる繰返しひずみはさまざまであるが、標準的な最大値を生ずる位置での繰返しひずみの類積頻度を図中に示した。なお、浮体のひずみ計測は平行部としてはほぼ最大値を示す位置である。
- (g) 図において実機プレース一般平行部と浮体試験体の斜線部を比較すると、試験体は実機のほぼ $\frac{1}{2}$ の値である。
浮体試験体は、実機よりかなりおだやかな条件にさらされていることになり、直感的には北海向の実機を長崎港外に設置した程度となる。
- (h) なお、実機でのひずみの繰返し数は 20 年(実機の標準耐用年数)で 10^8 とされている。浮体試験体の 20 年想定の繰返しひずみの累積頻度分布は、図の線図を平行移動することによって得られ、図中に点線で示す。
(図 2.20)

*) 縦軸に示すひずみ範囲とそれを越える回数の関係を示す。

**) たとえば D.O.E OFFSHORE DESIGN GUIDANCE (1984)

(英国エネルギー省)

2.5 構造物の防食性試験に関するまとめ

超重防食指向の防食被覆材 8 種及び同等品比較材 2 種の防食仕様を実環境モデル浮体試験体に施工し、現地環境内で 3 年間経過後の性能を評価した。

- (1) 海中部、飛沫部及び大気部に施工した各被覆材の外観はいずれも良好で、予想通りの防食性を示している。
- (2) 海中部被覆材中、塗装系では損傷時の防食性に不安、ライニング系2種ではインピーダンスの評価結果に今後の検討を要するものがあるが、現時点の3年間の結果から長寿命型を判定することは困難で、さらに長期間のフォローが望ましい。
- (3) 浮体試験体に設けた応力部の調査結果から、構造物に加わる応力のインターバル及び応力分布のデータを取得した。
- (4) これによると、最大ひずみは 200μ で 1×10^4 回/年程度であり、 200μ 以下のひずみが 7×10^8 回/年発生している。この程度の応力では各被覆材とも3箇年の経時では劣化の傾向はほとんどみられない。

以上

参考文献

- [1] 日本造船研究協会研究資料 N.369
- [2] 金属表面技術協会学術講演大会講演要旨集 Vol. 68 th PAGE 32~33, 1983
「接水環境塗装鋼の寿命予測技術」(三菱重工業長崎研)柴田他

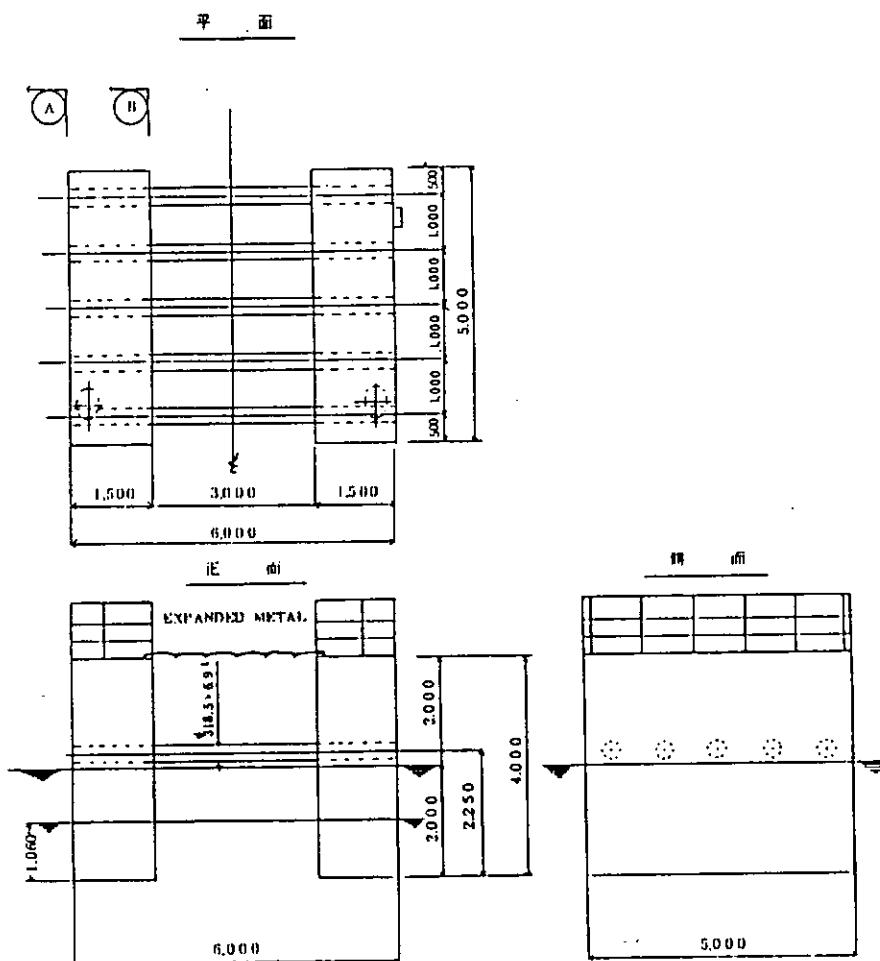


図 2.1 浮体式試験体の外観寸法

表2.1 浮体式試験体の防食仕様

部位	場所	仕防 様 No. 食	S/ P	2次表面 処理	材 料 と 膜 厚 (μm)	合計膜厚 (μm)
海 中 部 ・ 飛 沫 部	①	2	IZP	Ss	IZ(75) + ミストコート + TE(250)	325
	②	4	"	-	TE(200) + TE(200)	400
	③	6	"	Sd	PEM(5000)	5000
	④	7	"	"	PEF(650) + PET(650)	1300
	⑤	8	"	"	ESF(750) + ESF(750)	1500
	⑥	M1	"	"	ESF(") + ESF("	1500
	⑦	M2	"	"	TEF(") + TEF("	1500
洋 上 大 氣 部	⑧	1	"	Ss	IZ+ミストコート+PE ^A / _C (75)+PE ^A / _C (100)+PE ^A / _C (100)+PU ^T / _S (40)(35)	350
	⑨	"	"	"	"+"+"+"+"+"+"	350
	⑩	3	"	-	PE ^A / _C (100)+PE ^A / _C (100)+PE ^A / _C (100)+PE ^T / _S (40)+PE ^T / _S (40)	380
	⑪	"	"	-	"+"+"+"+"+"+"	380
	⑫	"	"	-	"+"+"+"+"+"+"	380
	⑬	5	"	Ss	IZ+ミストコート+PE ^A / _C (75)+V ^A (60)+V ^T / _S (40)	275
	⑭	"	"	"	"+"+"+"+"+"	275
浮 体 内 部	⑮	M3	"	-	(空槽部)ケレン軽減型 TE	250
	⑯	M4	"	-	(")ソルベントレス型 TE	250
	⑰	M6	"	-	(海水バラスト部) 電防 (アノード)	-
デ キ	⑰	M5	-	-	(手摺部) ガルバナイト塗装系	700

注 Ss : スイープサンドblast処理

Sd : サンドblast処理

表 2.2 浮体本体の外観(3箇年後)

部位	被覆材※	測定項目	外観	さび・ふくれ
海 中 部	(2) IZ+TE	生物付着が著しい	0.03%以下の点錆あり	
	(4) TE	同上	0.03%以下の点錆あり(上記2)より、やや多い)	
	(6) PEM	"	○(良好)	
	(7) PEF	"	○	
	(8) ESF	"	○	
	(M ₁) ESF	"	○	
	(M ₂) TEF	"	○	
飛沫部	(2) IZ+TE	○(良好)	外洋側のみ、ごく一部に小ふくれあり	
	(4) TE	○	○	
	(6) PEM	○	○	
	(7) PEF	○	○	
	(8) ESF	○	○	
	(M ₁) ESF	○	○	
	(M ₂) TEF	○	○	
応力部	(2) IZ+TE	打診法による塗膜は異状なし 下面にわずかに生物付着あり	補修部のみ、TEの層間はがれ	
	(4) TE	同上	○	
	(6) PEM	"	○	
	(7) PEF	"	○	
	(8) ESF	"	○	
洋上大気部	(1) IZ+PE+PU	○(良好)	○	
	(3) PE	○	○	
	(5) IZ+PE+V	○	○	

注 ※印の()内は防食仕様を指す。

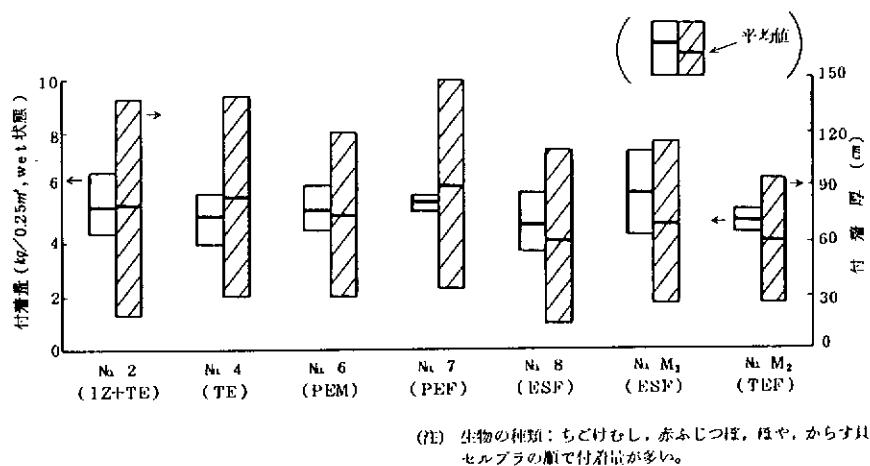


図 2.2 浮体本体の生物付着(海中部, 3箇年後)

仕様No. 2 (IZ+TE)	▲
仕様No. 4 (TE)	△
仕様No. 6 (PEM)	□
仕様No. 7 (PEF)	◇

仕様No. 8 (ESF)	▽
仕様No.M ₁ (ESF)	○
仕様No.M ₂ (TEF)	●

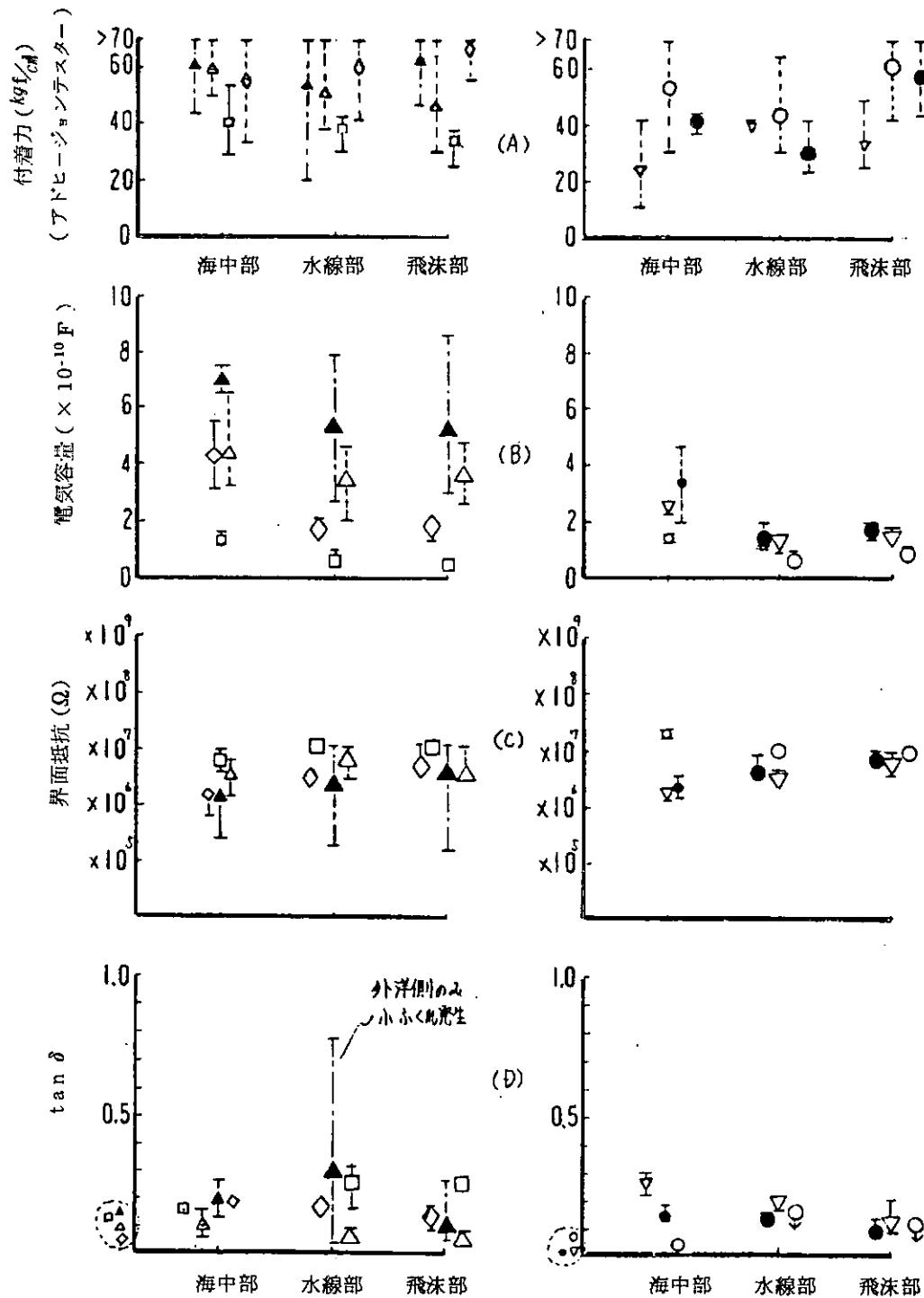


図 2.3 浮体本体の被覆材劣化(海中部及び飛沫部, 3箇年後)

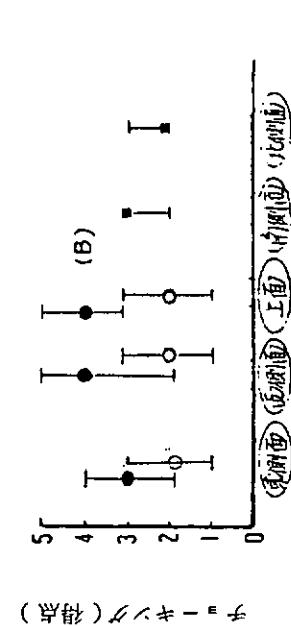
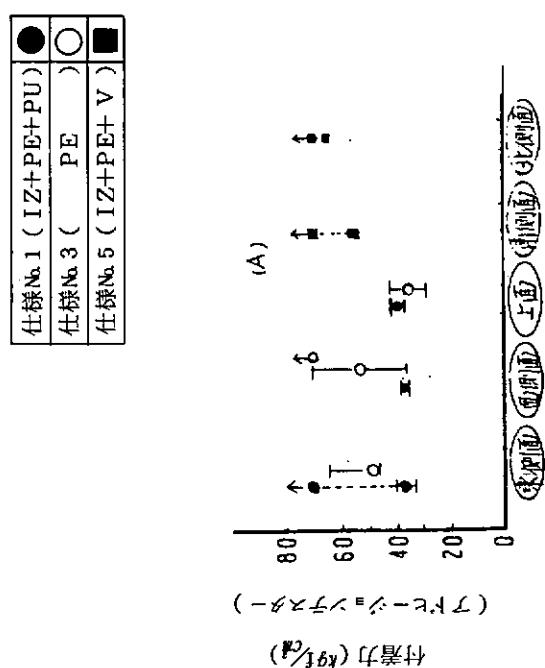
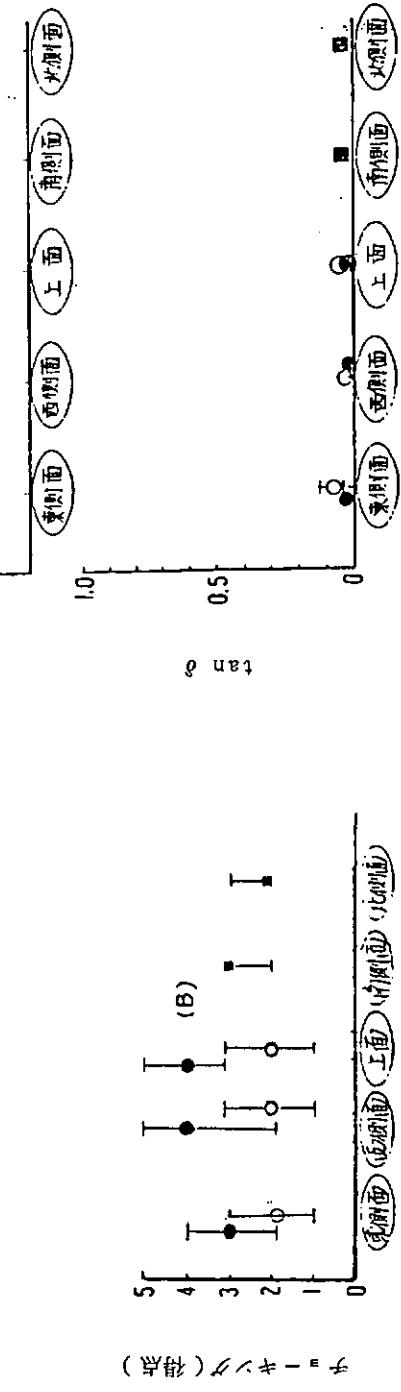
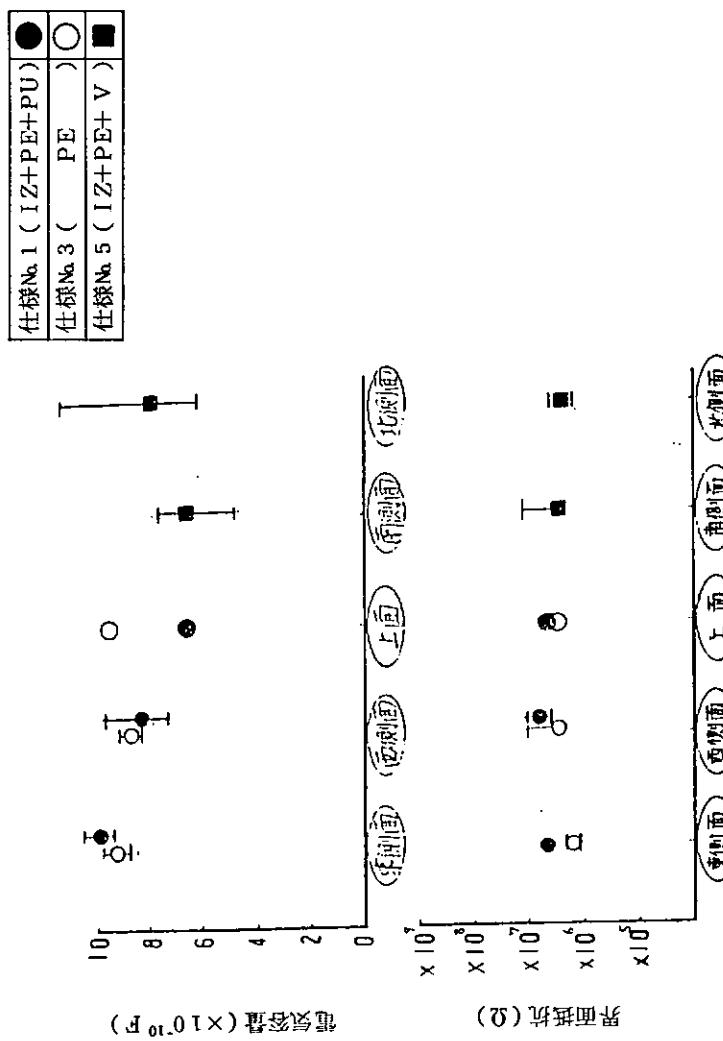
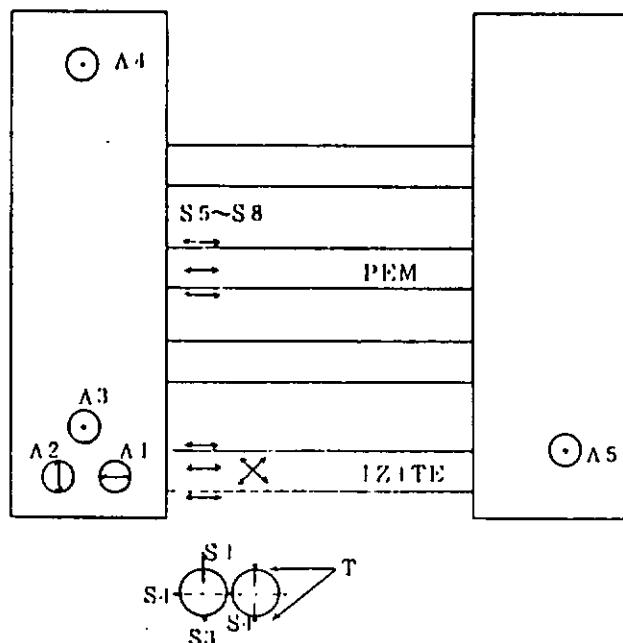


図 2.4 浮体本体の被覆材劣化(洋上・大気部, 3箇年後)

図 2.5 浮体本体の被覆材劣化(洋上・大気部, 3箇年後)



S1～S4：管軸方向のひずみ（管端）

長時間、計測用、合計12枚

S5～S8：“ “ “ (“)

(管ひずみ用)

T1～T4：管の剪断ひずみ (“)

A1～：浮体の横方向加速度

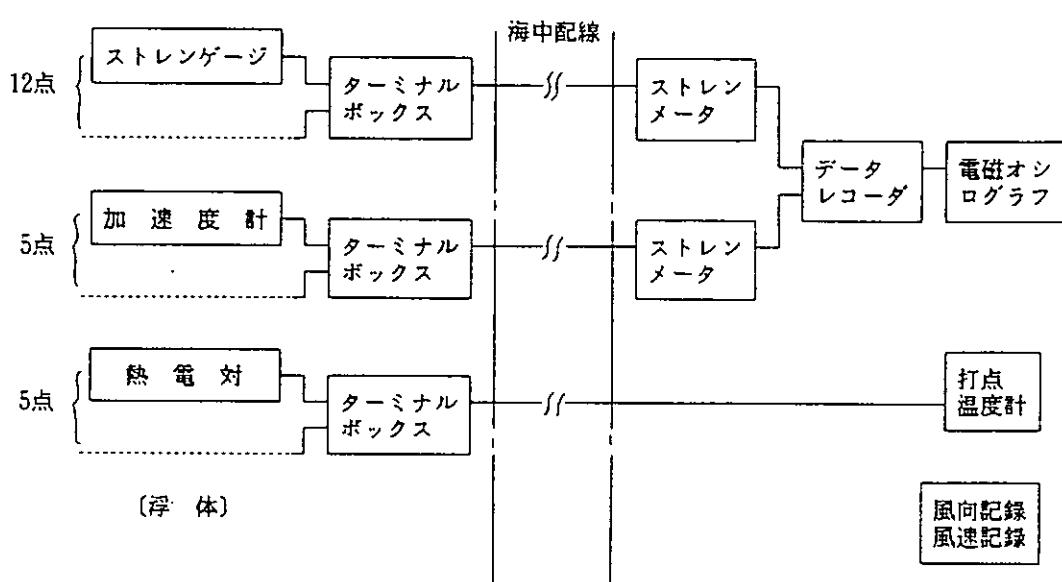
短時間、計測用

A2～：浮体の前方向の加速度

(動搖用)

A3～A5：浮体の上下方向の加速度

図 2.6 応力計測位置



(陸 地)

図 2.7 計測装置系統図

表 2.3 浮体本体の被覆材劣化(タンク内面, デッキ手摺部, 3箇年後)

部位	被 覆 材	測定項目	付着力(kgf/cm) (アトヒージョンスター)	さび・ふくれ	塗膜インピーダンス	平均防食電流密度(mA/m ² /h)
タンク内部 空槽部	仕様M3 ケレン軽減型 TE	42 ad 31 ad 68 cf 48 ad	平均 47	・一般部はさび, ふくれなし ・エッジ部の一部にさび発生	R 1×10^7 Ω以上 C $3.6 \sim 7.5 \times 10^{-1}$ F $\tan \delta 0.04$ 以下	
	仕様M4 ソルベントレス型 TE	> 70 > 70 > 70	> 70	同上	R 1×10^7 Ω以上 C $3.6 \sim 7.5 \times 10^{-10}$ F $\tan \delta 0.08$ 以上	
海水 バラスト部	仕様M6 電防(アノード)					6.15.8 3.5.4 (各タンク)
デッキ 手摺部	仕様M5 ガルバナイト 塗装系	(2mm目基盤目法) 8 (平均) 10点	9点	・さび, ふくれ なし ・チョーキング 3~4点		

(注) ※ ad : 接着剤のはがれ

cf : 塗膜の凝集破断

表 2.4 繰返しひずみ回数(3箇年間の推定値)

ひずみ ($\times 10^{-6}$)	0~30	~60	~90	~120	~150	~180	~210
上面	1.2×10^7 (59.2)	6×10^6 (29.5)	1.5×10^6 (7.4)	6×10^5 (3.0)	9×10^4 (0.4)	9×10^4 (0.4)	2.7×10^4 (0.1)
下面	1.2×10^7 (59.0)	6×10^6 (29.5)	1.5×10^6 (7.4)	6×10^5 (2.9)	1.2×10^5 (0.6)	9×10^4 (0.4)	3×10^4 (0.1)
側面	2.1×10^7 (98.6)	3×10^5 (1.4)	—	—	—	—	—

() 内は%

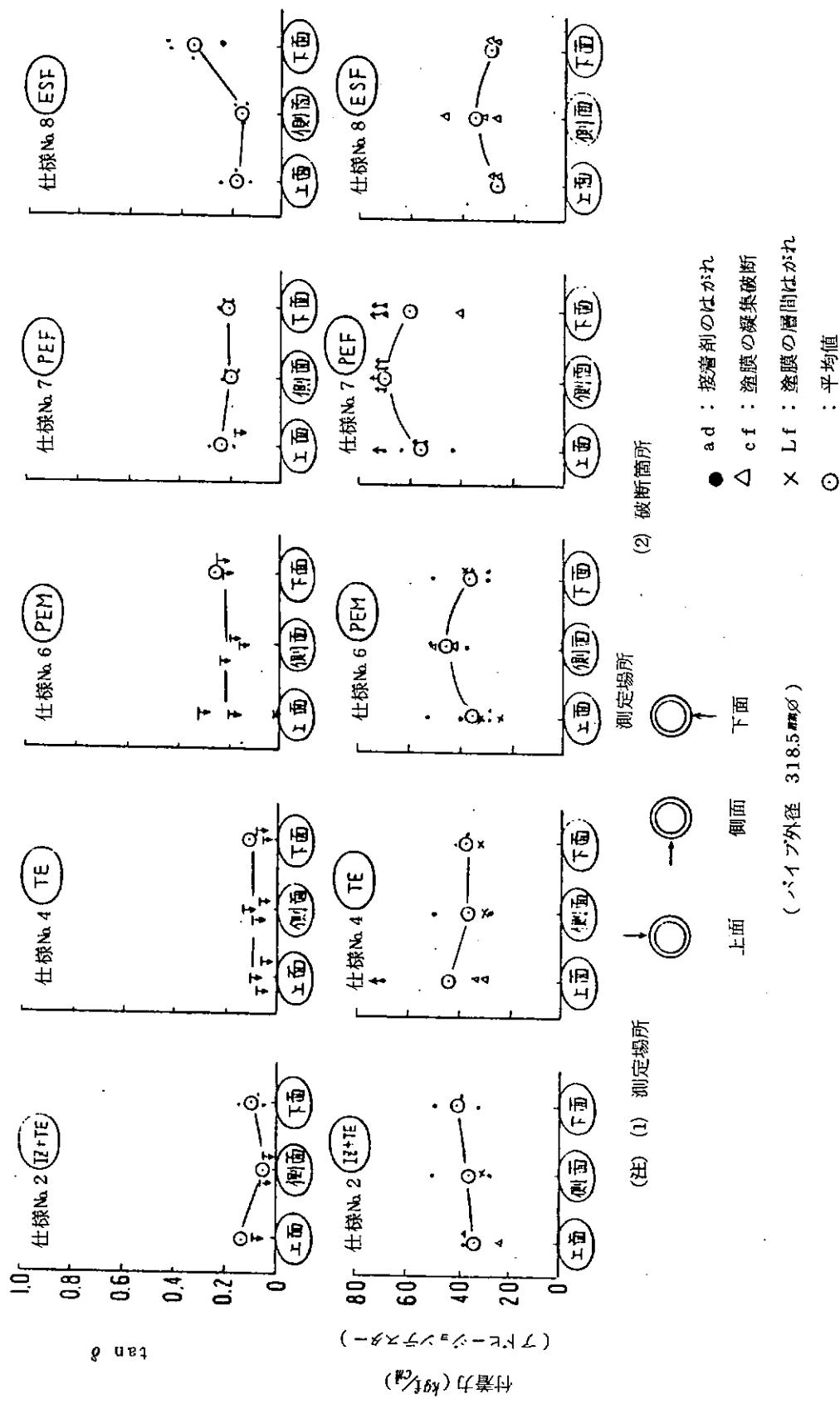
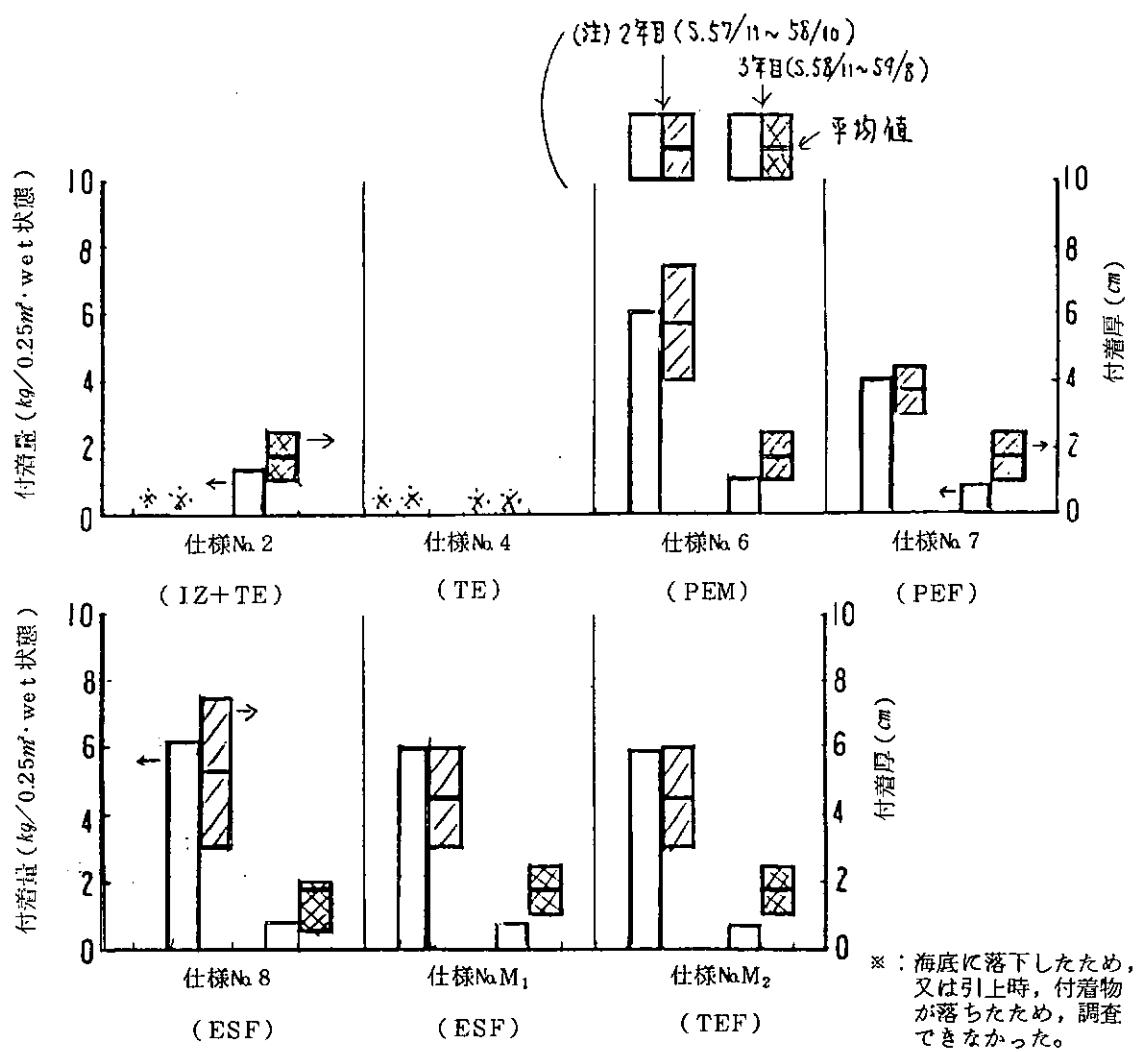


図 2.8 浮体の応力部の付着力, $\tan \delta$ の関係(3箇年後)



(注) 生物の種類: 赤ふじつぼ, からす貝, セルプラ, ほや

図 2.9 試験片の生物付着

表 2.5 試験片の外観評価(生物除去後)

測定項目 被覆材	外観			さび・ふくれ		
	1年目	2年目	3年目	1年目	2年目	3年目
(2) IZ+TE	異常なし	異常なし	異状なし	なし	なし	なし
(4) TE	同上	同上	同上	"	"	"
(6) PEM	生物除去時に補修膜の一部に層間はがれ	同左	同左	"	"	"
(7) PEF	破壊テスト時、ごく一部に層間はがれ	同左	同左	"	"	"
(8) ESF	異常なし	異常なし	異常なし	"	"	"
(M ₁) ESF	同上	同上	同上	"	"	"
(M ₂) TEF	同上	同上	同上	"	"	"

仕様No. 2 (IZ+TE)	▲---▲
仕様No. 4 (TE)	△---△
仕様No. 6 (PEM)	□---□
仕様No. 7 (PEF)	◊---◊

仕様No. 8 (ESF)	▽---▽
仕様No. M ₁ (ESF)	○---○
仕様No. M ₂ (TEF)	●---●

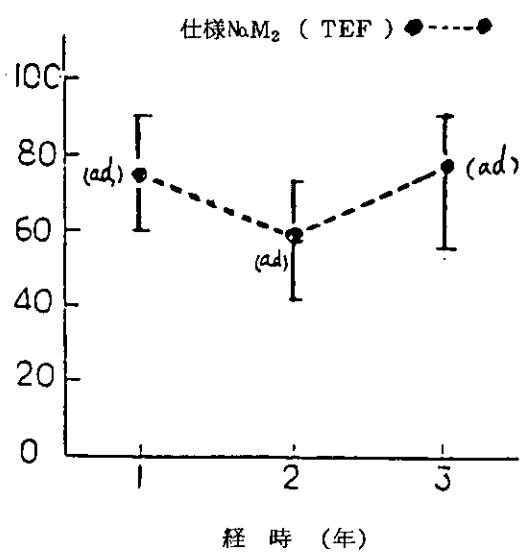
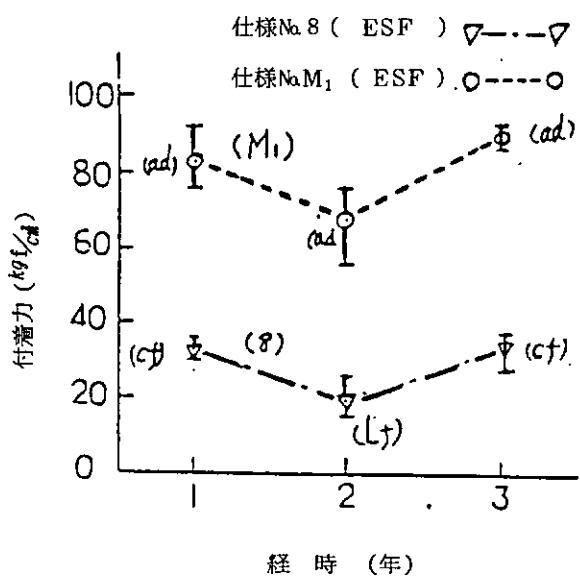
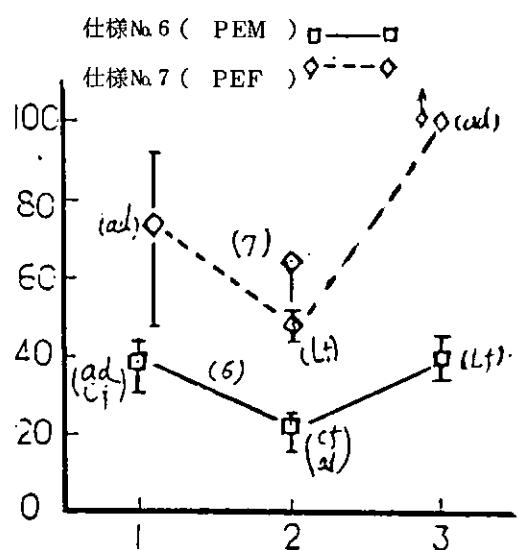
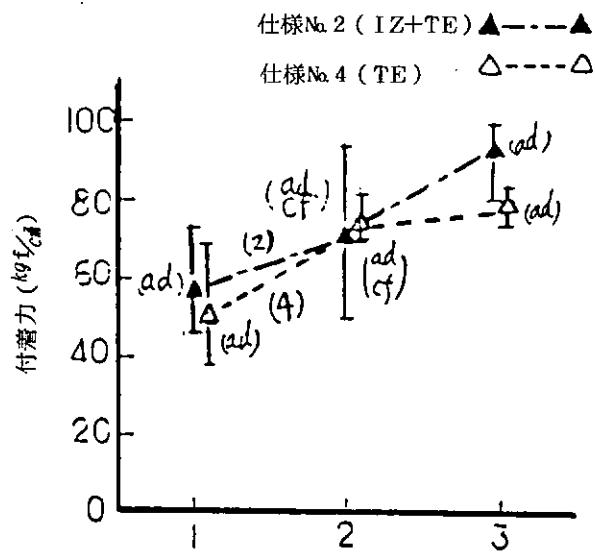


図 2.10 実環境試験片膜の付着力 (引張試験機) の経時変化

図中 ad : 接着材のはがれ
(cf : 塗膜の凝集破断)
Lf : 塗膜の層間はがれ

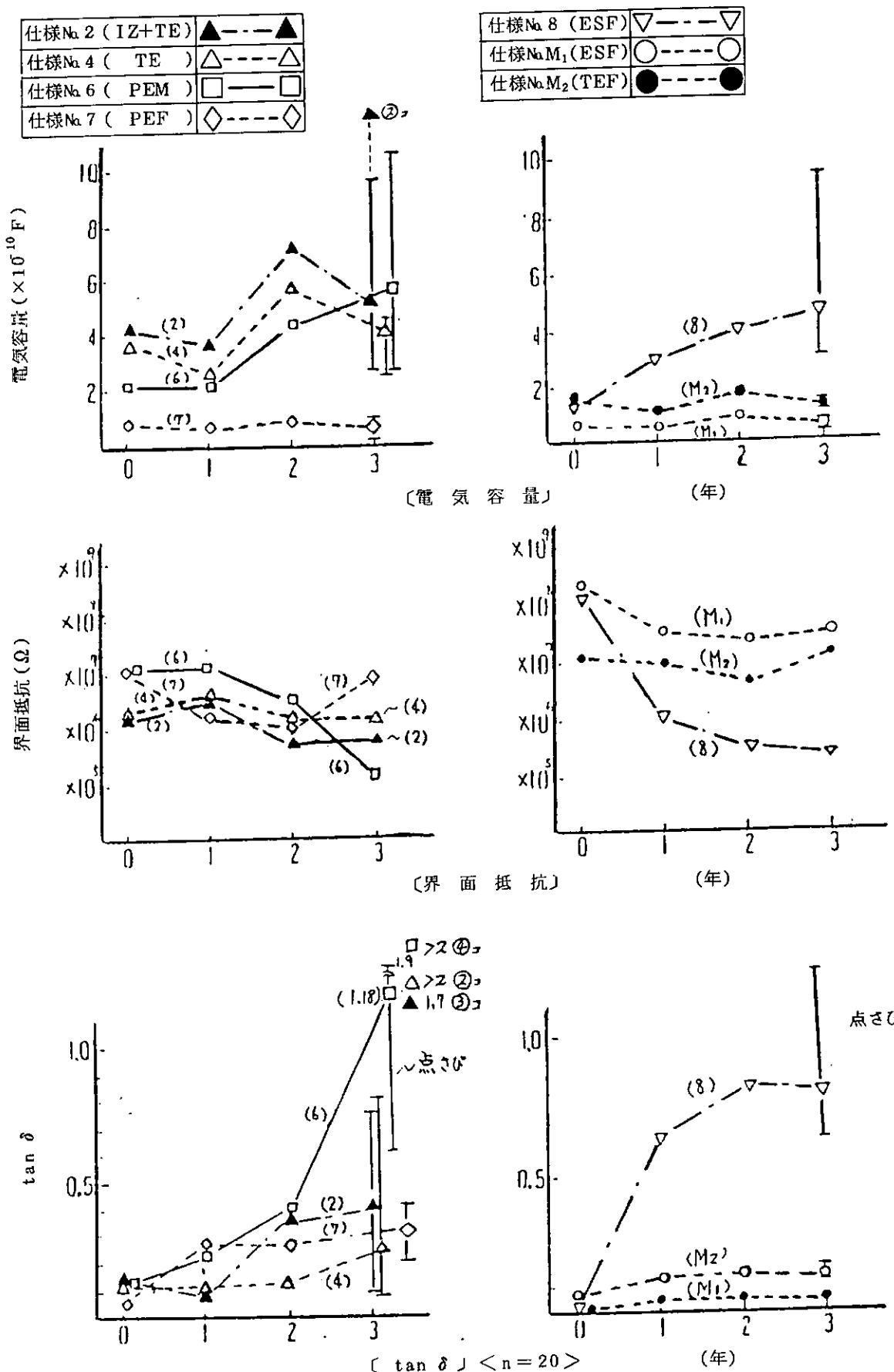


図 2.11 実環境試験片膜のインピーダンス経時変化

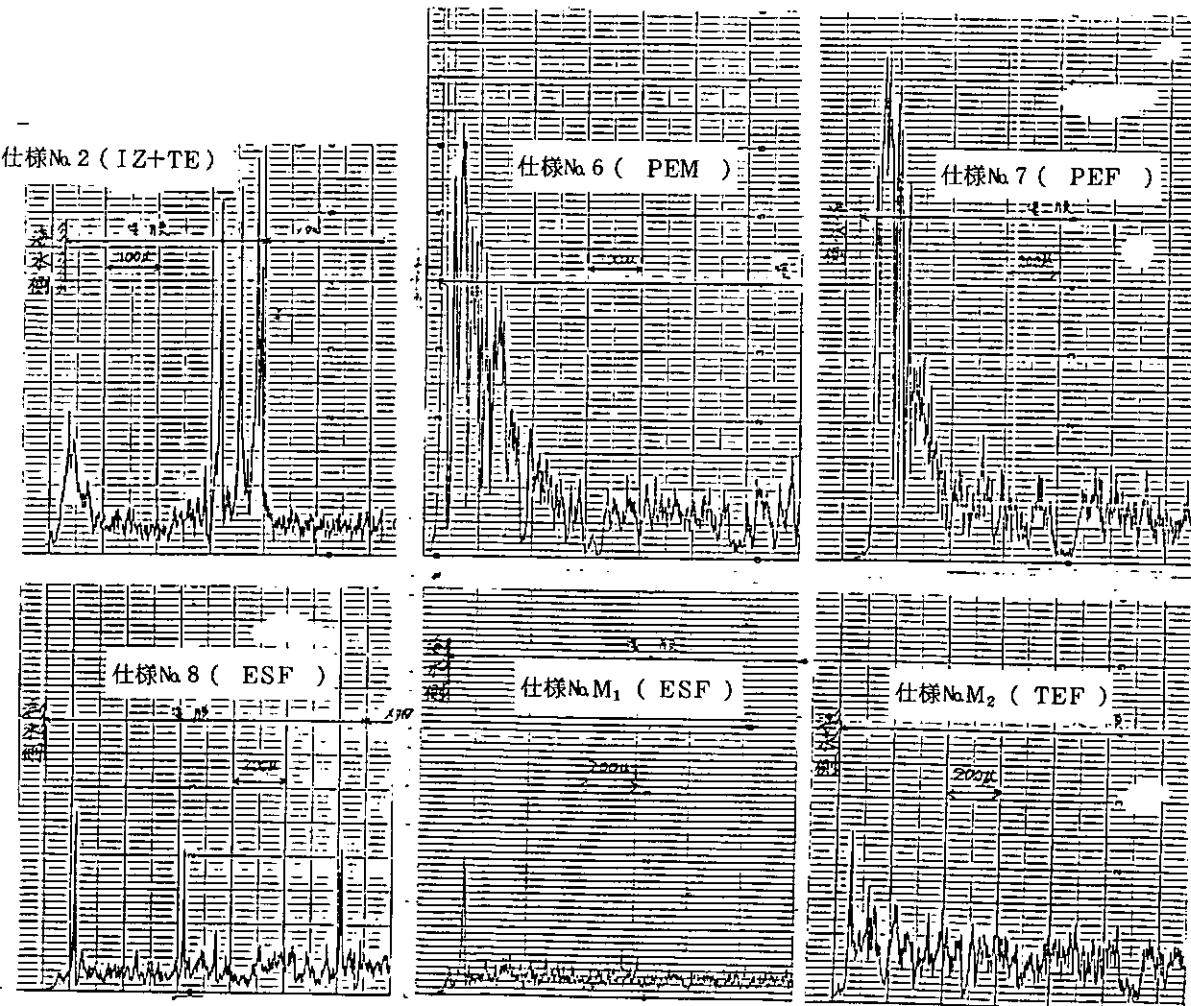


図 2.12 X線マイクロアナライザーによる塩分(c1)浸透深さ測定結果(試験片, 3箇年後)

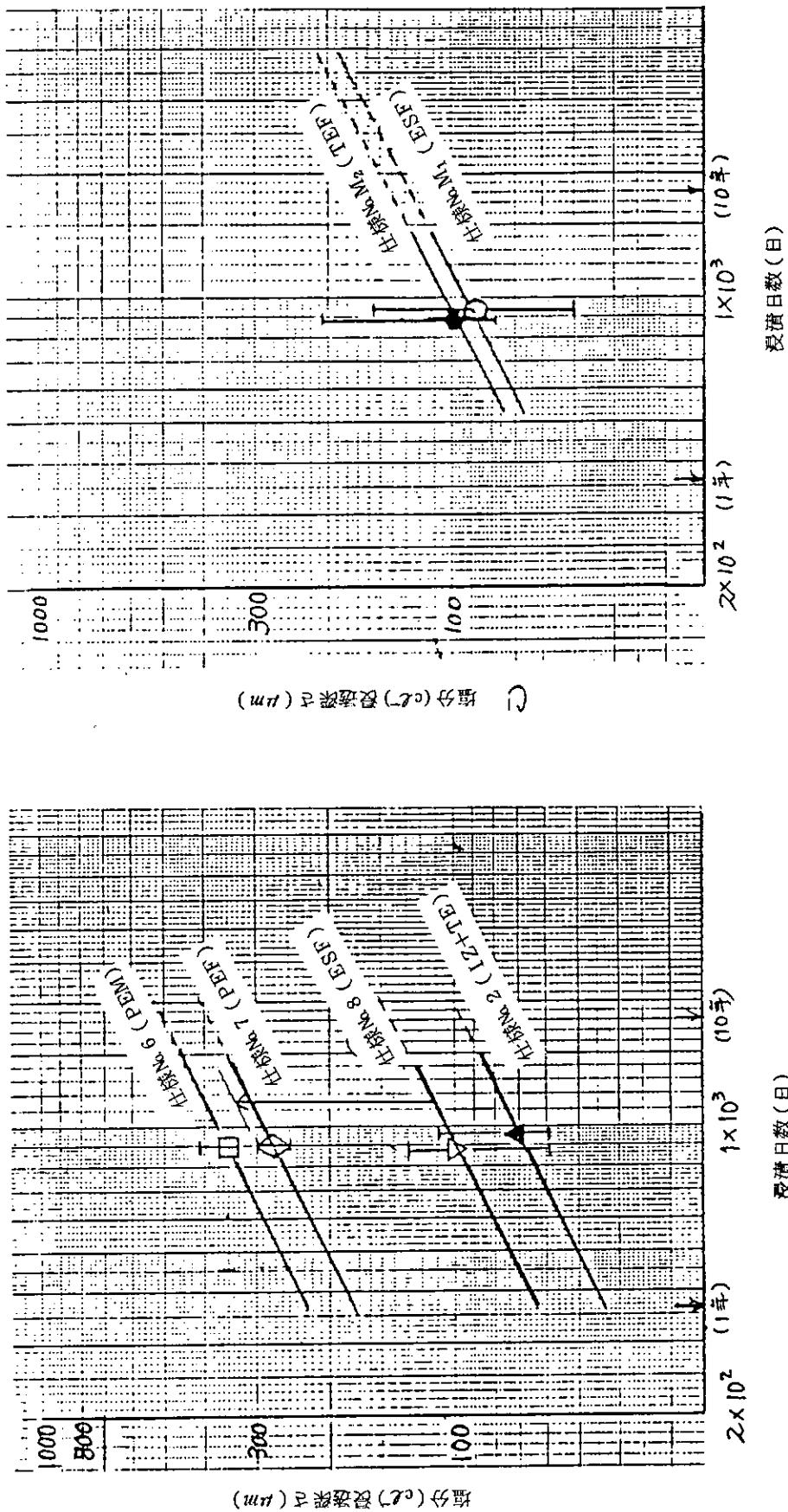
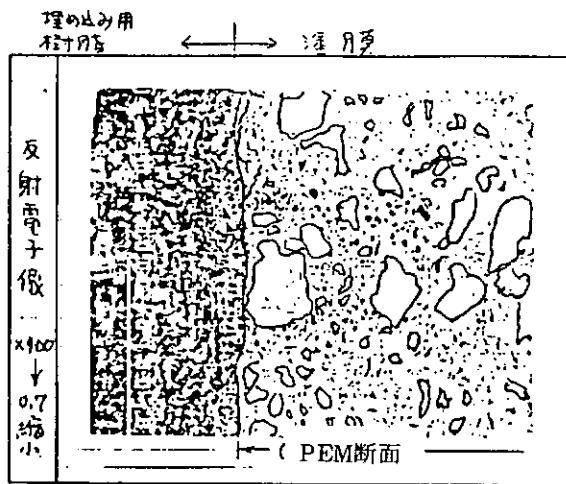
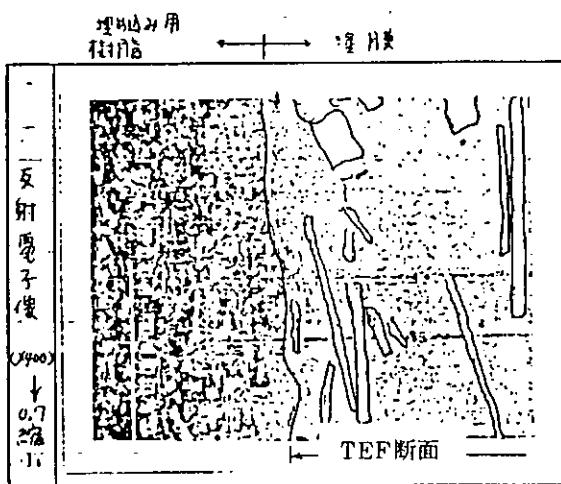


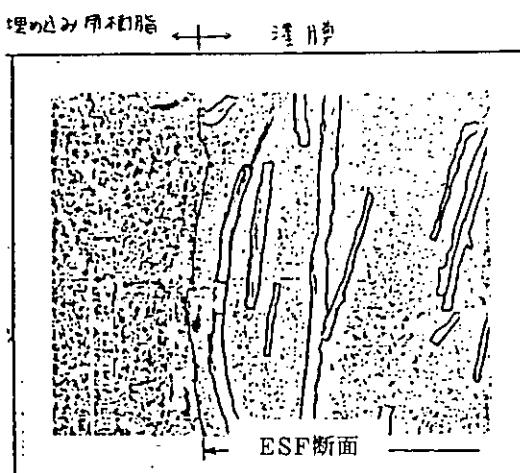
図 2.13 涂膜への塩分 (NaCl) 及び透水性 (試験片)



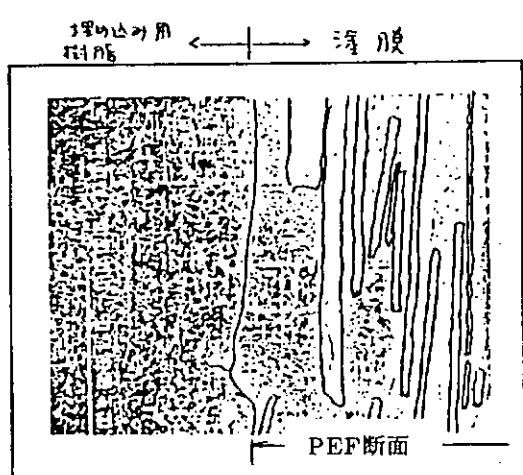
仕様No. 6



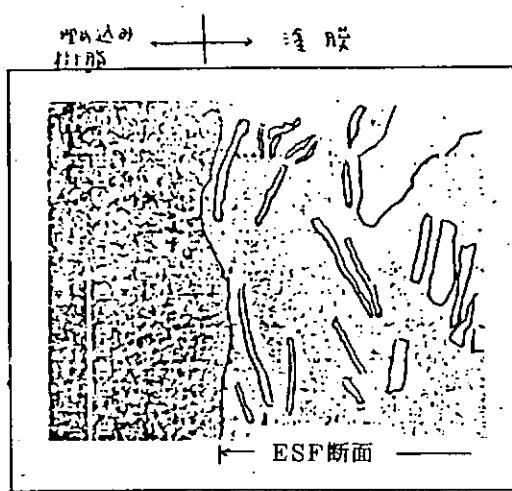
仕様No. 7



仕様No. 8



仕様No. M₁



仕様No. M₂

図 2.14 ライニング系皮膜断面(海水浸漬 3箇年後)

- 海象
- ◎ A、B : 海流、潮位 (第7区海上保安本部報告書)
 - ◎ C : 海水温度 (長崎海洋気象台、水の浦一大波止間の中央部)
 - ◎ D : 海水温度 (三菱重工業㈱・香焼工場)
 - ◎ E、F : 海水のPH、塩濃度 (長崎県環境部報告書)
- 気象
- ⊗ G : 気温、風速、風向き、雨量、日照時間 (長崎海洋気象台)
 - ⊗ H : 風速 (三菱重工業㈱・香焼工場)
- 測定点
- ◎ J : 波浪強さ (長崎海洋気象台・野母崎測候所)

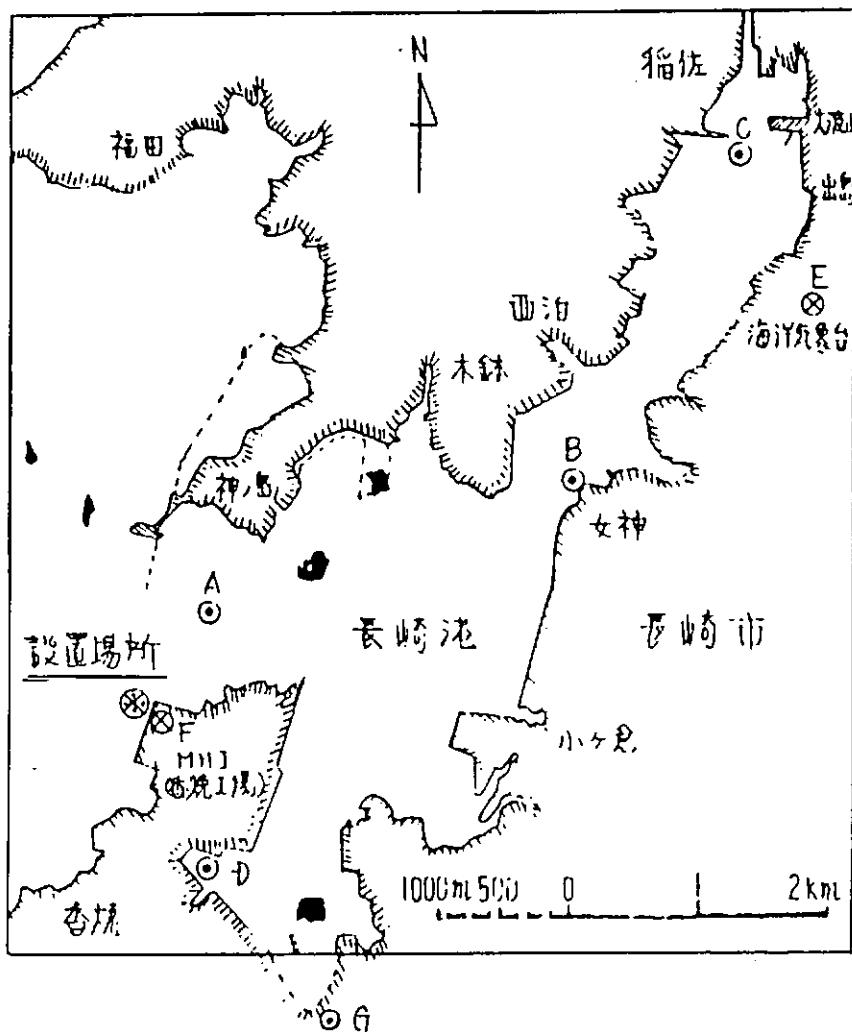
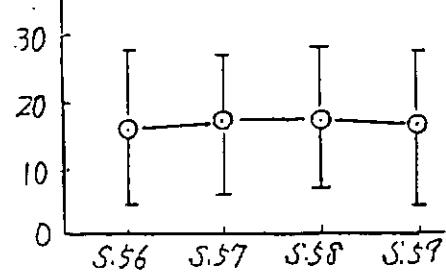
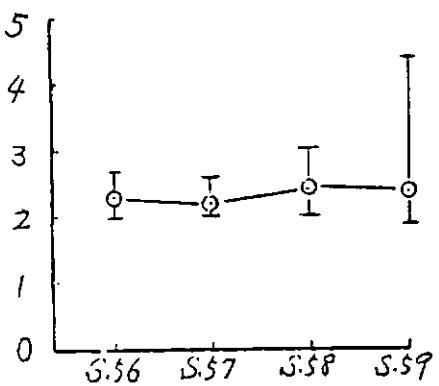


図 2.15 海象・気象測定点

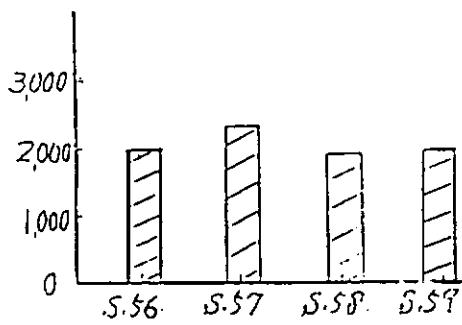
気温(平均, °C)



風速(平均, m/sec)



日照時間(積算, Hr)



雨量(積算, mm)

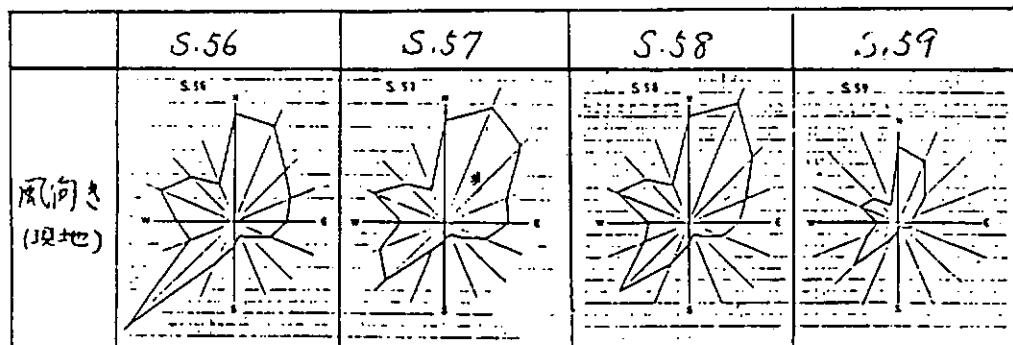
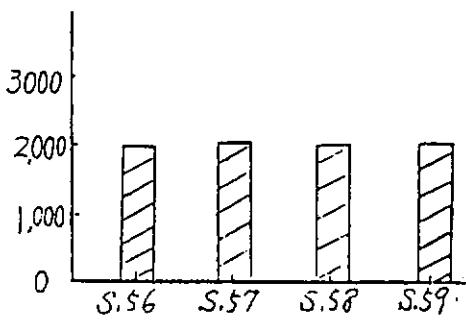


図 2.16 気象(長崎海洋気象台)

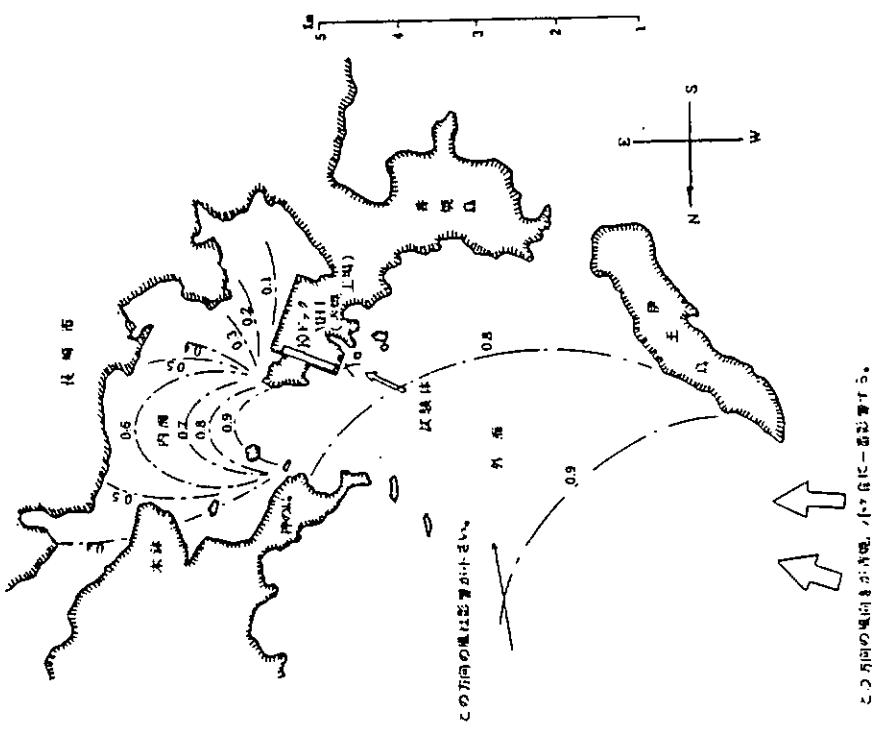


図 2.17 長崎港周辺の波高減衰比率表
(長崎海洋気象台データによる)

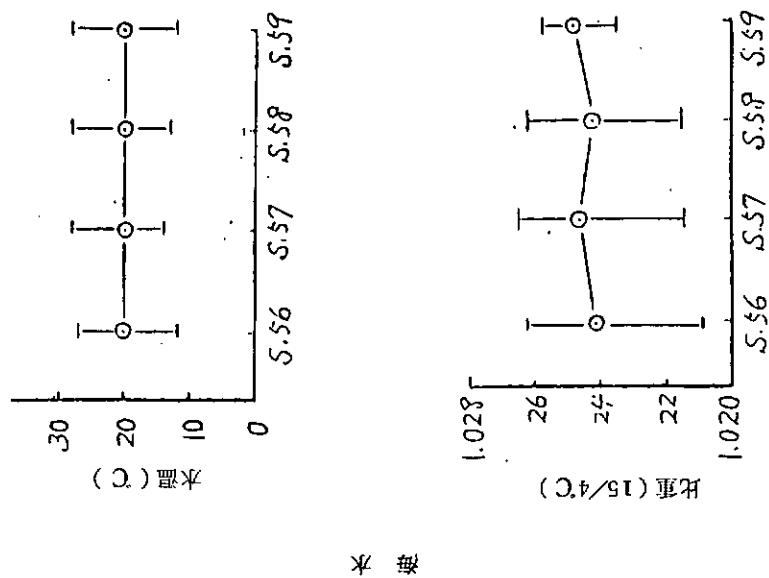


図 2.18 海象(水産試験場)

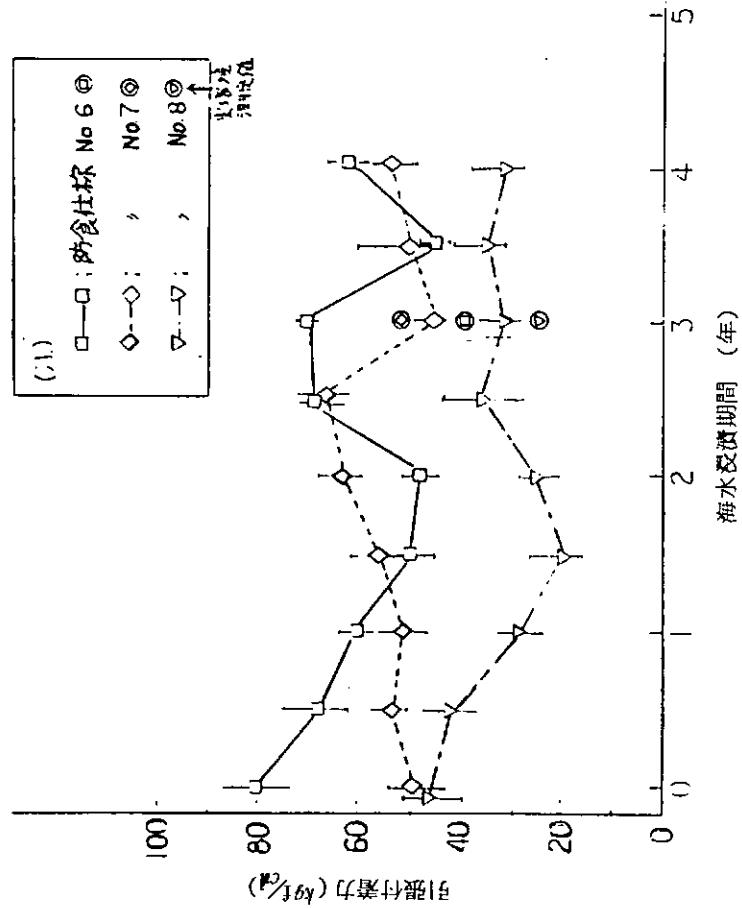
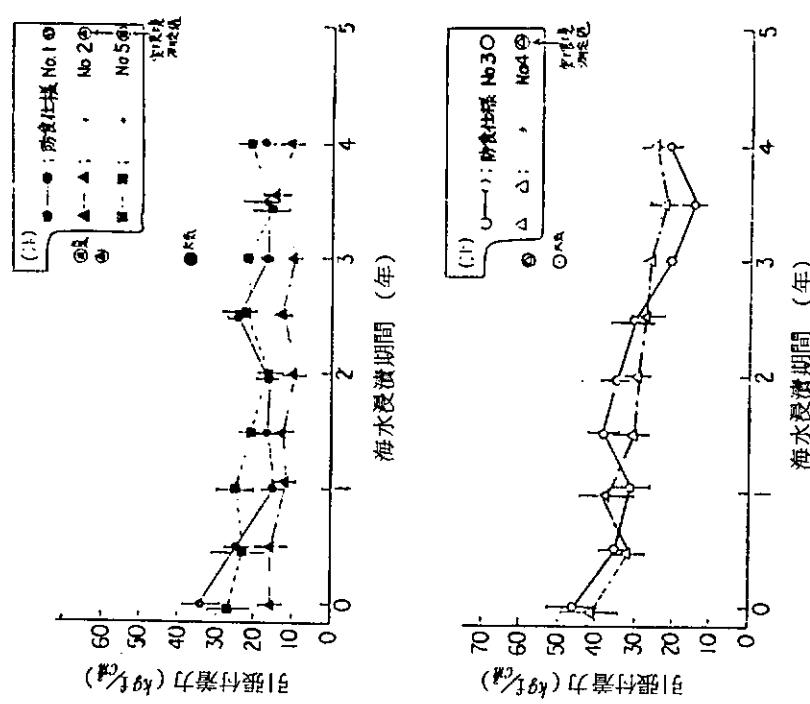


図 2.19(1) 実験室結果と実環境試験体の付着力 (塗装系仕様)

図 2.19(2) 実験室結果と実環境試験体の付着力 (ライニング系仕様)

表 2.6 実験室と実環境浮体の繰返し応力の比較

防 食 仕 様 No.	膜 厚 (mm)	実験室 繰返し応力付加試験				実環境浮体応力付加試験		
		皮膜にクラックが発生した時期	素材から破断した時期	膜 厚 (mm)	発生したひずみ(max.)	繰返し数(回)		
曲げ応力(kgf/mm ²)	繰返し数(回)	曲げ応力(kgf/mm ²)	繰返し数(回)					
塗装系仕様	1	0.41	—	—	—	—	—	—
	2	0.45	—	—	2.5	7.3×10^5	0.36	200μ 3.0×10^4 異常なし
	3	0.41	—	—	—	—	—	—
	4	0.51	2.5	6.5×10^5	2.5	7.3×10^5	0.40	200μ 3.0×10^4 異常なし
	5	0.4	2.0	1.0×10^6	2.5	1.4×10^5	—	—
ライニング系仕様	6	4.7～5.0	1.5	1.0×10^5	2.0	1.1×10^5	4.2	200μ 3.0×10^4 異常なし
	7	0.95 ～1.2	2.5	1.8×10^5	2.5	2.6×10^5	1.14	200μ 3.0×10^4 異常なし
	8	1.4～1.7	2.0	8.3×10^5	2.5	1.5×10^5	1.45	200μ 3.0×10^4 異常なし

(注) (1) ひずみ $200\mu = 4.2 \text{ kgf/mm}^2$

(2) 実験室試験は表1参照

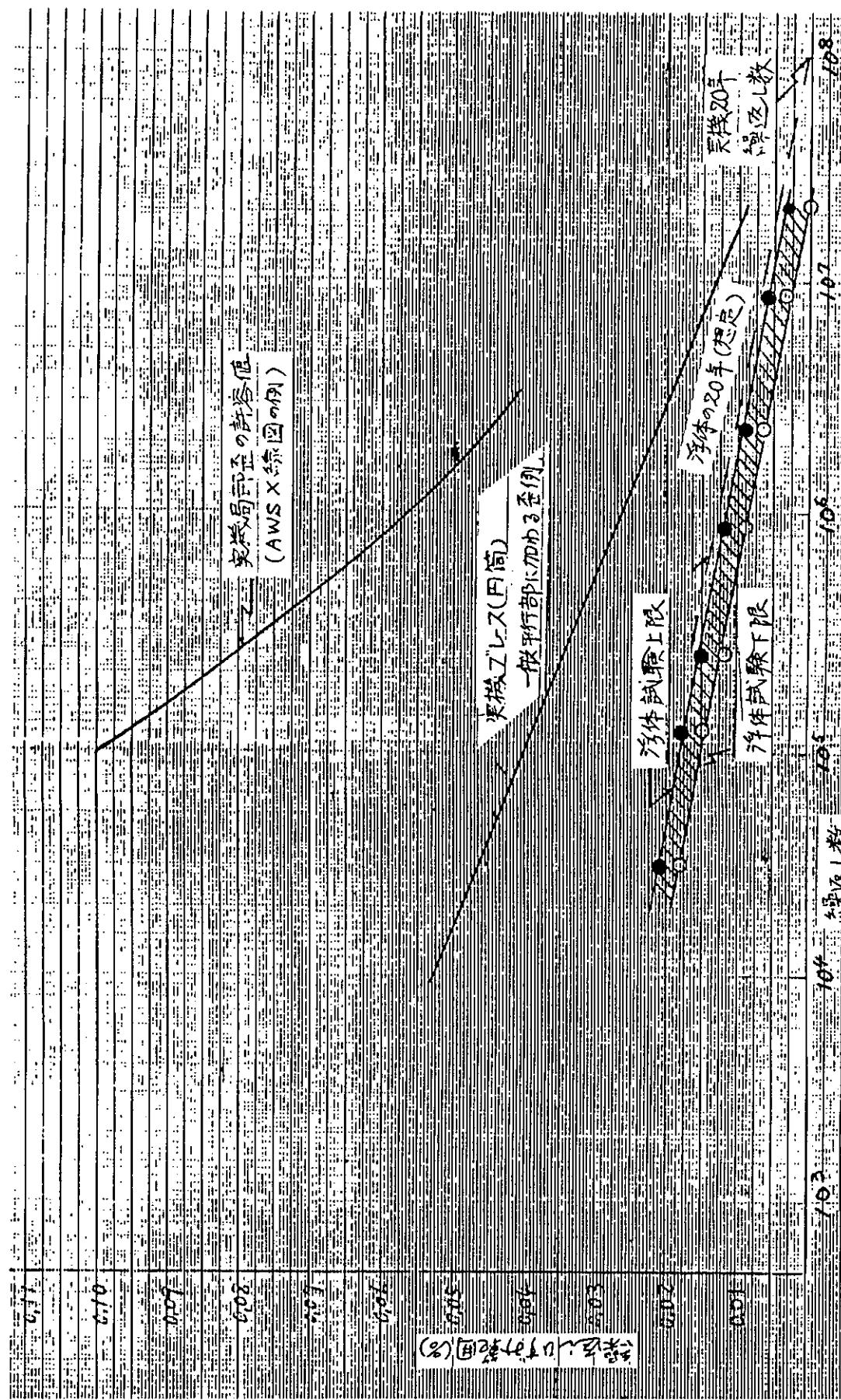


図 2.20 線返し歪の累積頻度分布

3. 防食材料の寿命推定法に関する検討

概 要

防食材料の寿命を推定するためには、第1に何らかの方法により防食材料の劣化を促進し、実海域における劣化状態を短時間の間に模擬再現させる必要があり、第2には促進実験及び海域暴露の両試料と同一の判定（または診断）方法により測定して両者の比較検討を行い、促進劣化の模擬性能及び実海域の暴露時間に相当する時間係数（促進率）を求める必要がある。

前者の劣化促進法はなるべく促進率が高く、短時間の間に材料劣化が進むことが望ましい。また、後者の劣化判定法のためには、唯1つの物性値だけでは不充分と考えられ、防食材料の機械的強度特性（引張り強度、付着力等）や電気的特性（交流インピーダンス、直流抵抗、 $\tan \delta$ 等）などの種々の物性値を用いる必要があると考えられる。劣化によるこれら物性値の変化は、防食材内部の欠陥の増大及び材料自体の材質変化により水やイオンの浸透が進むために生じるものと考えられるため、このようなミクロ的な現象を把握した上で機械的または電気的特性値を整理検討することが望ましい。

本章においては、上記のようなねらいの下に、各種の劣化促進法を試み、その結果生じる物性値の変化を種々の方法により測定した結果を示す。5年間に亘る各種の劣化促進法とその劣化判定法をまとめて表3-1に示した。

劣化促進法を大別すれば、塩水浸漬試験（塩分濃度、温度、溶存酸素量等をパラメーターとする）、促進耐候試験（いわゆるウェザーオーメーター）、熱サイクル試験（温度振幅、保持時間等をパラメーターとする）、温度差浸漬試験、熱冷衝撃試験（熱冷振幅、浸漬時間、サイクル数等がパラメーターとなる）、紫外線照射試験等があり、またこれらの組合せた方式も考えられた。

劣化判定法には単離塗膜に対するものと塗装鋼板に対するものとがあり、前者は最終的に採用される劣化判定法というよりは劣化により生じる物性値相互の関連を見出すために行われた。

単離塗膜に対する判定法としては、引張強度、ガス透過率、イオン透過量等が採用された。また塗装鋼板については、引張付着力、電気的インピーダンス（各種周波数の交流）、直流電気抵抗、曲げ試験、ピンホール検出、カレントインターラプター法による電気特性等が採用された。さらに、初期に塗膜に含まれている欠陥の影響を検討するために、塗装膜厚の分布に関する測定、故意に欠陥を設けた塗膜下の腐食状態の観測等も行われた。

特に本研究の最終年度である59年度においては、塗膜下腐食の発生と腐食速度の測定に主眼をおいてカレントインターラプター法による劣化判定法の研究を行い、また熱冷衝撃浸漬による塗膜劣化促進実験をさらに拡張し、それらの結果と実海域暴露結果との比較解析を実施した。

表 3.1 寿命推定法研究の推移

年度	試験片	検討した防食仕様	劣化促進試験法	劣化判定法	結果	備考
5.5	単離膜 〔はく離紙上に塗装〕	3%NaCl, 1wk 促進耐候性 168h	引張強度 ガス透過率(O ₂ ガス使用)	付着力 体積抵抗、表面抵抗、(直流) 容量、抵抗, tan δ(0.5及び1kHz)	体積抵抗は∞、表面抵抗 は測定不能	文献73点を調査 評価法を整理 〔外観、電気化学的、機械的〕
5.6	塗装板 (150×75×3.2) (グリッドプラスト)	3%NaCl, 1wk 促進耐候性 168h	引張強度 ガス透過率(O ₂ ガス使用)	付着力 体積抵抗率(直流) 容量、抵抗, tan δ(0.5/1kHz)	熱サイクルで一部割れ発生	
5.7	塗装板 (150×75×3.2) (グリッドプラスト)	・食塩水浸漬(0.3, 3, 10%/ 常温40°, 60°/1wk/M, 3M) ・促進耐候性(40°, 60°/168h, 400, 600hr) ・気中熱サイクル(min, -30°~ 10°max, 80°~90°10サイクル)	引張強度 ガス透過率(O ₂ ガス使用)	付着力 体積抵抗率(直流) 容量、抵抗, tan δ(0.5/1kHz)	塩水浸漬で、温度による 促進効果大	
5.8	欠陥(0.2or0.5φ/1 個or16個)つき塗装板 (50×50×3.2 SS41)	・食塩水浸漬(3%, 60°, O ₂ , 吹込み、紫外線照射, 3M) ・海水(神戸港)浸漬 (室温、空気吹込み, 3M) ☆健全塗装板には、塩水噴霧を追 加	欠陥下の腐食幅(曲げにより塗膜 をはがす)	付着力 インピーダンス(1kHz)	・欠陥の大きさ、数による 差なし ・下地の影響大	
5.9	健全塗装板 (150×75×3.2) (SS41)	・単離膜(10cmφ) ・塗装板 (150×75×3.2)	TE 1.50 μm PEM 5.00 μm PEF 3.00 μm	・飽和NaCl溶液(60°C, 75日 間)によりイオン透過	Na ⁺ , Cl ⁻ , I ⁻ イオンの透過速度 インピーダンス(1kHz)	TE 1.50 μmでCl ⁻ の透 過速度決定 I ⁻ の使用不可
	塗装板 (300×100×4)	TE 1.50 μm PEM 5.00 μm PEF 3.00 μm	・大気中露露・水噴霧熱冷衝撃 (0°~60°, 0°~100°)、温度差浸 漬・NaCl 3% 溶液浸漬(60°C)	3点曲げによるピンホール発生 付着力、インピーダンス、塗膜厚	熱冷衝撃試験による付着 力、インピーダンス変化 に相関がある	膜厚分布不均一による 欠陥の可能性
	塗装板 (150×70×3.2) (SS41)	TE (200~600 μm) PEM(300~1300 μm) PEF(300~1500 μm)	・促進耐候性+塩水噴霧 ・促進耐候性+3%NaCl(60°C)	カレントイントラブラー法によ る塗膜の電気抵抗、界面の分極抵 抗、塗膜下の腐食速度測定	・本法による劣化判定は かなり有効	
	塗装板 (300×100×4)	TE 1.50 μm PEM 5.00 μm PEF 3.00 μm	・大気露露・熱冷衝撃 ・海洋露露	3点曲げ、付着力、インピーダン ス、曲面板の塗膜厚分布	・曲率と膜厚分布関係 ・エボキシ系塗料の劣化、 機構	SR 182 データ間の 関連づけを行った

3.1 促進試験と塗膜劣化判定法

3.1.1 カレントインターラプター法による塗膜劣化判定法(59年度実施)

(1) 実験の目的

塗膜の防食性能とは塗膜下素地の腐食速度(以下、塗膜下腐食速度と言う)を低く抑える能力と言えることができる。もし、塗膜下で生じている腐食反応を腐食電流(以下、塗膜下腐食電流と言う)として測定できれば、塗膜下腐食速度が求まり、塗膜の防食性能を定量的に評価することができる。

本年度はこうした観点より、カレントインターラプター法による塗膜下腐食速度の測定に主眼を置き、塗膜劣化判定法への応用について検討することを目的とした。

(2) 実験方法

(a) 供試防食材料は1.2.2.3の防食仕様のうち、M4のタールエポキシ(TE), M7のエポキシガラスフレーク(PEF), 及びM8のポリエスチルガラスフレーク(ESF)の3種とした。なお、標準仕様以外に膜厚の薄いものも対象としたが、これらをまとめて表3.1.1に示す。

試験片の素地はSS41, 尺法は $150 \times 70 \times 3\text{mm}$ とした。

(表3.1.1)

(b) 塗膜の劣化促進試験方法

劣化促進試験方法として2種類の方法を用いた。一つは促進耐候試験60時間後、塩水浸漬20日間を1サイクルとする方法(以下、パクロAと言う)であり、もう一つは促進耐候試験60時間後、塩水噴露20日間を1サイクルとする方法(以下、パクロBと言う)である。促進試験の設定条件を表3.1.2に示す。

(表3.1.2)

(c) 測定装置と測定方法

図3.1.1に測定装置のブロック図を、図3.1.2に測定セルの概要を示す。カレントバルスジェネレーターに付属しているプローブの3つの端子と図3.1.2の試験片(W), 基準電極(R), 白金対極(C)をそれぞれ接続する。そしてプローブに内蔵されているエレクトロメーターにより自然電位を測定する。次にW-C間に定電流パルスを印加して試験片を一定時間分極し、電流切断後の電位変化をX-Tレコーダーで記録する。電位変化が速すぎてX-Tレコーダーで直接記録することが困難な場合はトランジットコンバーターに一時記憶させ、時間を引き延ばして記録する。(図3.1.1, 図3.1.2)

こうして測定された実測電位 V_t の波形の一例を図3.1.3に実線で示す。 V_t は図3.1.3の上部に示した塗装鋼板の等価回路の両端の電位差であり、 R_t, C_t (塗膜の電気抵抗、電気容量)の並列回路の両端の電位差 V_t と R_p, C_d (塗膜下の電気抵抗、電気容量)の並列回路の両端の電位差 V_p の和で表わせる。印加電流値を*i*、電流切断後の時間を*t*とすると、 V_t と*t*の関係は(1)式で、 V_p と*t*の関係は(2)式で示される。

$$V_t = i \cdot R_t \exp(-t/\tau_t) \quad \dots \quad (1)$$

$$V_p = i \cdot R_p \exp(-t/\tau_p) \quad \dots \quad (2)$$

ここで $\tau_t = R_t \cdot C_t \quad \dots \quad (3)$

$$\tau_p = R_p \cdot C_d \quad \dots \quad (4)$$

であり、電気抵抗と電気容量からなる並列回路の時定数である。

$R_t > R_p$, $\tau_p > \tau_t$ として(1)式および(2)式を用いて、図3.1.3に V_t の波形を破線で、 V_p の波形を鎖線でそれぞれ示す。*t*が大きい所での実線の(*t*, V_t)座標は、鎖線の(*t*, V_p)座標に近似される。これらを図3.1.4に示すように時間*t*と電位の対数 $\ln V_p$ でプロットすると、(2)式の両辺の対数を取って得られる次の線上の点になる。

$$\ln V_p = \ln i \cdot R_p - t/\tau_p \quad \dots \quad (5)$$

したがって図3.1.4に示した直線の傾きと、縦軸の切片より R_p , C_d を求める。

R_p , C_d がわかると(2)式より任意の時間の V_p が求められるので*t*が小さい所での実線の(*t*, V_t)座標を(*t*, V_p)座標に変換できる。変換した(*t*, V_t)座標から R_p の場合と同様にして R_t , C_t を

求める。

測定面積 1 cm²当たりの塗膜下腐食電流 i_{corr} (A/cm²) は、(6)式から求める。

$$i_{corr} = 1 / \{ 2.3 R_p (1/\beta_a + 1/\beta_c) \} \quad \dots \dots \quad (6)$$

ここで β_a , β_c はアノード, カソードのターフェル係数であり、中性の食塩水中の SS 41 の場合、 $\beta_a = 57 \text{ mV}$, $\beta_c \rightarrow \infty$ である。

塗膜下腐食速度 M (mm/year) は、 i_{corr} から(7)式で求める。

$$M = 11600 / i_{corr} \quad \dots \dots \quad (7) \quad (\text{図 3.1.3, 図 3.1.4})$$

(3) 実験結果

(a) カレントインターラプター法による塗膜の電気抵抗の測定結果

(i) 標準仕様塗装鋼板

図 3.1.5 はバクロ A における防食仕様 #4, #7 及び #8 の R_t の経時変化を示す。初期から 1 サイクルで R_t は大きく低下するが、2 サイクル以降ほぼ一定値を示す。しかし、防食仕様間で、 R_t に大きな差が認められ、#4, #7, #8 の順に R_t が小さくなる。

次に図 3.1.6 にバクロ B における防食仕様 #4, #7 及び #8 の R_t の経時変化を示す。防食仕様 #7 及び #8 の低下傾向はバクロ A に比べてやややかである。(図 3.1.5, 図 3.1.6)

(ii) TE 塗装鋼板

図 3.1.7 は TE 塗装鋼板の R_t に及ぼす暴露条件及び膜厚の影響を示す。本仕様は防食仕様 #4 と異なり、下地はショットブラスト処理でショッププライマーは無く、塗り重ね回数はいずれも 1 回である。膜厚が 600 μm 及び 400 μm では R_t の低下はごくわずかであった。しかし、膜厚が 200 μm の場合はバクロ A, B 共に R_t の低下が著しい。特に、バクロ A では 2 サイクル終了時点 (約 107 Ω · cm²) でブリスターが観察された。(図 3.1.7)

(iii) PEF 塗装鋼板

図 3.1.8 に PEF 塗装鋼板の場合の例を同様に示す。この場合、2 サイクルまでは、 R_t は暴露条件及び膜厚の影響をほとんど受けていない。しかし、2 サイクル以降では、バクロ A, 膜厚 300 μm での R_t が直線的に低下する傾向を示した。(図 3.1.8)

(iv) ESF 塗装鋼板

図 3.1.9 に ESF 塗装鋼板の場合の例を示す。この場合は、バクロ A, B 共に R_t の低下が著しくすでに 2 サイクルで R_t が 10⁷ Ω · cm² 以下に低下している。特にバクロ A の方が著しく R_t が低下しており、約 10⁻⁵ Ω · cm² となっている。

以上の結果から以下の点が判明した。

- ① R_t の低下傾向からみて、バクロ A の方がバクロ B より促進効果が高い。
- ② 膜厚の差による R_t の低下傾向の相違は初期に於いてはさほど認められないが、促進サイクルと共にその差があらわれてくる。
- ③ バクロ A における膜厚 200 μm の TE 塗装鋼板の結果から判断すると、 R_t が 10⁷ Ω · cm² 以下になると塗膜の劣化が進行し、防食性能が著しく低下することが分かった。(図 3.1.9)

(b) カレントインターラプター法による塗膜下腐食速度の測定結果

(i) 標準仕様塗装鋼板

図 3.1.10 に防食仕様 #4, #7 及び #8 のバクロ A における塗膜下腐食の経時変化を示す。塗膜下腐食速度は初期から 1 サイクルにかけて大きく増大し、2 サイクル以降はほとんど変化していない。しかし、防食仕様の間には塗膜下腐食速度に大きな差が認められ、防食性能は #4, #7, #8 の順に悪くなっている。

図 3.1.11 に防食仕様 #4, #7 及び #8 の 2 サイクル終了後及び 5 サイクル終了後の塗膜下腐食の状態をスケッチで示す。塗膜下腐食速度が 10⁻⁵ mm/year 程度で点さびが発生し、10⁻³ mm/

year 程度になると全面さびに近くなることが分った。

防食仕様 No.4, No.7 及び No.8 のバクロ B における塗膜下腐食速度の経時変化を図 3.1.1.2 に、 塗膜下腐食状態のスケッチを図 3.1.1.3 に示す。塗膜下腐食速度が $10^{-6} \sim 10^{-7}$ mm/year 程度では点さびが発生するもののその割合は少いことが分かる。このように本法で求めた塗膜下腐食速度と塗膜下腐食状態との間には明らかな相関性が認められた。 (図 3.1.1.0 ~ 3.1.1.3)

(ii) その他の塗装鋼板

図 3.1.1.4 ~ 1.6 に主として膜厚が薄い場合の TE, PEF, ESF の塗膜下腐食速度に及ぼす暴露条件と膜厚の影響を調べたものを示す。同じ試験片に対する塗膜の電気抵抗 R_t はすでに図 3.1.7 ~ 図 3.1.9 に示したが、両者はほぼ同じ傾向の影響の受けかたを示している。すなわち、 R_t が下がれば塗膜下腐食速度が増大するという関係が認められる。 (図 3.1.1.4 ~ 3.1.1.6)

(4) 考 察

以下、本実験結果をもとに促進率と塗膜寿命の推定、並びに交流及び直流法による塗膜の電気抵抗の比較について述べる。

(a) 塗膜の電気抵抗の経時変化

バクロ A の場合の 1 サイクルは 20 日間の塩水浸漬を伴うので、1 サイクルを 20 日とする。初期塗膜の暴露日数は、測定時間を考慮して 1 時間すなわち $1/24$ 日とする。こうして換算された暴露日数の対数を時間軸として図 3.1.5 を書き換えると図 3.1.1.7 となる。ここで暴露日数の対数を x 、 R_t の対数を y としてそれぞれの防食仕様の x と y の関係を直線回帰して示すと、防食仕様 No.4 の場合は(8)式、防食仕様 No.7 の場合は(9)式、防食仕様 No.8 の場合は(10)式で示される。

$$y = -0.28x + 11.0 \quad \dots \quad (8)$$

$$y = -0.64x + 10.0 \quad \dots \quad (9)$$

$$y = -1.86x + 9.28 \quad \dots \quad (10)$$

(図 3.1.1.7)

(b) バクロ A の促進率

防食仕様 No.4, No.7 及び No.8 の実海水浸漬約 1200 日後の塗膜の電気抵抗及び塗膜下腐食速度を表 3.1.3 に示す。この R_t の対数を(8)式、(9)式及び(10)式の y に代入し x を求めると x はそれぞれ 1.1, 1.5, 1.7 となり、平均すると約 1.4 となる。これを暴露日数に換算すると約 30 日となる。すなわち、実海水浸漬 1200 日が促進試験バクロ A では 30 日に相当することになる。したがってバクロ A の実海水浸漬試験に対する促進率はおよそ 40 倍と推定される。 (表 3.1.3)

(c) 塗膜の寿命推定

この促進率を用いて、塗膜下腐食速度が 10^{-5} mm/year 以上となるまでの暴露サイクル数（または、塗膜の電気抵抗が $10^7 \Omega \cdot cm$ 以下となるまでの暴露サイクル数）C と塗膜の推定寿命 Z [年] の関係は(12)式で示される。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{C \times 20(\text{日}) \times \text{促進率}}{365(\text{日})} \\ &= 2.2 \times C \quad [\text{年}] \end{aligned} \quad \dots \quad (12)$$

例えば、膜厚が $200 \mu m$ の TE 塗装鋼板の場合の推定寿命は、図 3.1.7 の塗膜の電気抵抗からは約 4.4 年、図 3.1.1.4 の塗膜下腐食速度からは約 3.3 年と推定される。

(d) 交流法及び直流法による塗膜の電気抵抗の比較

これまで塗膜の電気抵抗といえばほとんど交流法によって測定されたものであった。そこで、交流法による R_t を比較するため、同じ試験片を 2 つの方法で測定した。交流法 (1 KHz) による R_t の対数を縦軸に、直流法による R_t の対数を横軸にとりプロットした結果を図 3.1.1.8 に示す。直流法による R_t が交流法による R_t より大きい。特に高抵抗側になると両者の差が大きくなる。そして両者の間に次式で示す関係が認められる。

$$y = -0.073 x^2 + 1.71 x - 2.15 \quad \dots \dots \quad (11)$$

ここで、 y は交流法による R_t の対数、 x は直流法による R_t の対数を示す。 (図 3.1.1.8)

(5) まとめ

- (a) 防食仕様 No.4, No.7 及び No.8 の防食性能は塗膜の電気抵抗、塗膜下腐食速度いずれで判定しても防食仕様 No.4, 防食仕様 No.7, 防食仕様 No.8 の順に悪くなる。
- (b) カレントインテラブター法で求めた塗膜下腐食速度が 10^{-5} mm/year であるとかなり点さびが発生し始め、約 10^{-3} mm/year になると全面さびに近くなる。このように本方法によって塗膜下の腐食状況をおおむね推定することが可能である。

また、本法でもとめた塗膜の電気抵抗 R_t を用いても同様の推定が可能であることが判明した。

- (c) 1 KHz の交流法で求めた塗膜の電気抵抗の対数 y と直流法で求めた塗膜の電気抵抗の対数 x の間に次のごとき相関関係が認められた。

$$y = -0.073 x^2 + 1.71 x - 2.15$$

- (d) バクロ A はバクロ B より促進効果が高いことが分った。

3.1.2 過去に検討した促進試験と塗膜劣化判定法

促進試験と塗膜劣化判定法に関して昭和 55 年度から各種の検討を行ってきた。本年度の研究結果は 3.1.1 に述べたとおりであるが、昨年度までの研究結果の概要について以下に簡単に述べる。

(1) 文献調査

促進試験と劣化判定法について、日本科学技術情報センターとロッキード社の文献情報検索システム、その他により調査した。調査文献(73 件)については、55 年度報告書(研究資料 No.341, P.101 ~ 111)に記載したのでここでは省略する。これらの文献を参考にして促進試験と塗膜劣化判定法の検討を行った。

(2) 促進試験法の検討

海洋構造物に用いられる重防食塗装の防食性能を評価、選定するためには、長期防食性能を評価するに適した促進試験法を確立する必要がある。56, 57 年度では表 3.1.4 に示す促進試験法について検討した。塩水浸漬試験では塗膜劣化に対する温度の影響が大きく、その他の因子の影響はさほど大きくなかった。加速テスト条件としては、60°C, 空気吹き、3% NaCl が実験の範囲内では適当と考えられた。

促進耐候試験では、塗膜の電気抵抗と $\tan \delta$ の増加傾向がやや認められる程度であった。また、熱サイクル試験では付着力、塗膜の電気抵抗等で特に劣化は認められなかった。割れ発生の場合には昇温、降温速度の効果が大であった。 (表 3.1.4)

(3) 塗膜劣化判定法

(a) 交流インピーダンスによる方法

従来、劣化判定法としてよく用いられる方法であり、本研究においても促進試験後の劣化判定として、塗膜の空気抵抗、電気容量を測定した。一般に試験時間と共に電気抵抗が減少し、電気容量は増大するが、その変化の状況は塗料によってかなり異なる。常温の海水浸漬による塗膜の電気抵抗及び電気容量の変化の例を図 3.1.1.9 に示す。特に ESF では、これらの変化が大きい点が認められた。

(b) Cl⁻イオンの透過量による判定法

単離膜の Cl⁻イオン透過量をイオン電極で計測した。58 年度はイオン電極法による測定技術の確立及び劣化前の塗膜の Cl⁻イオン透過係数を求めた。59 年度は、劣化膜についても計測を行った。しかし、劣化と Cl⁻イオン透過性との間の相関性は明確には認められなかった。

3.1.3 促進試験と塗膜劣化判定法のまとめ

以上の結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 促進試験としては、促進耐候試験60時間と60℃塩水浸漬20日間を交互に行う方法が良いと考えられる。しかし、1000μm前後の厚膜型塗料に対しては、本条件でも促進効果がやや弱い場合があり、さらに強い促進劣化法か又はさらに長時間の試験(2~3年)を考慮する必要がある。
- (2) 劣化判定法として、交流法及び直流法による塗膜の電気抵抗、イオン電極法によるCl⁻イオン透過量、カレントインテラブター法による塗膜下腐食速度などの検討を行った。このうち、直流法による塗膜の電気抵抗と塗膜下腐食による判定が比較的、劣化判定法として適していることが分った。
- (3) 塗膜寿命については、塗膜の電気抵抗又は塗膜下腐食速度である程度推定することが可能であるが、上記の電気抵抗や腐食速度は必ずしも時間と共にリニアな変化挙動を示さないこと、ばらつきが大きいこと、また厚膜型塗料に関しては、促進試験といえどもかなり長時間のテストが必要であることなどが、今後の検討課題として残された。
- (4) 直流法による塗膜の電気抵抗と交流法による塗膜の電気抵抗の間に一定の関係があることが分った。そして、高抵抗側では直流法による計測が適していることが分った。

表 3.1.1 本検討項目で採用した防食仕様

防食仕様	防食材料	素地調整	ショットプライマー	塗回数	膜厚(μm)	備考
4	TE	ショットblast	I Z P	2	400	
7	PEF	サンドblast	—	2	1300	標準仕様塗装鋼板
8	ESF	サンドblast	—	2	1500	
4'	TE	ショットblast	—	1	200, 400, 600	TE 塗装鋼板
7'	PEF	"	—	1	300, 500	PEF 塗装鋼板
8'	ESF	"	—	1	300, 5000	ESF 塗装鋼板

表 3.1.2 促進試験の設定条件(59年度)

№	促進試験法	設 定 条 件
①	促進耐候試験	JIS K5400 7.6 促進耐候試験方法による、60時間
②	塩水浸漬試験	60℃, 3%NaCl水溶液、空気吹込み、20日間
③	塩水噴霧試験	JIS K5400 7.8 塩水噴霧試験による、20日間

(注) バクロA(1サイクル); ①+②, バクロB(1サイクル); ①+③

表 3.1.3 常温、実海水浸漬約1200日後の塗膜の電気抵抗及び塗膜下腐食速度の測定値

R_t, M	仕 様	防食仕様 No. 4	防食仕様 No. 7	防食仕様 No. 8
塗膜の電気抵抗、 R_t ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)		5.0×10^{10}	1.1×10^9	1.3×10^8
塗膜下腐食速度、 M (mm/year)		4.5×10^{-9}	9.1×10^{-5}	1.1×10^{-2}

表 3.1.4 促進試験方法と試験条件(59年度を除く)

促進試験方法	試験条件
塩水浸漬試験	<ul style="list-style-type: none"> (1) 温度；RT, 40°C, 60°C (2) NaCl濃度；0.3%, 3%, 10% (3) 溶存酸素；空気吹込み, O₂吹込み (4) 紫外線照射；あり, なし (5) 試験時間；1週間, 1箇月, 3箇月
促進耐候試験	<ul style="list-style-type: none"> (1) 室内温度；40°C, 60°C (2) 試験時間；168時間, 400時間, 600時間
熱サイクル試験 (空気中)	<ul style="list-style-type: none"> (1) 最高温度；80°C, 90°C (2) 最低温度；-30°C~10°C (3) 升温・降温速度；110°C/h, 80°C/h

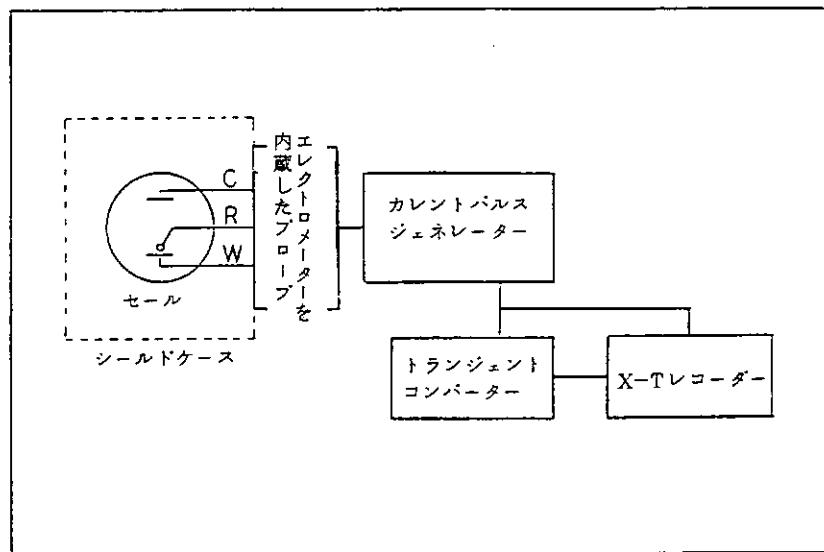


図 3.1.1 測定装置のブロック図

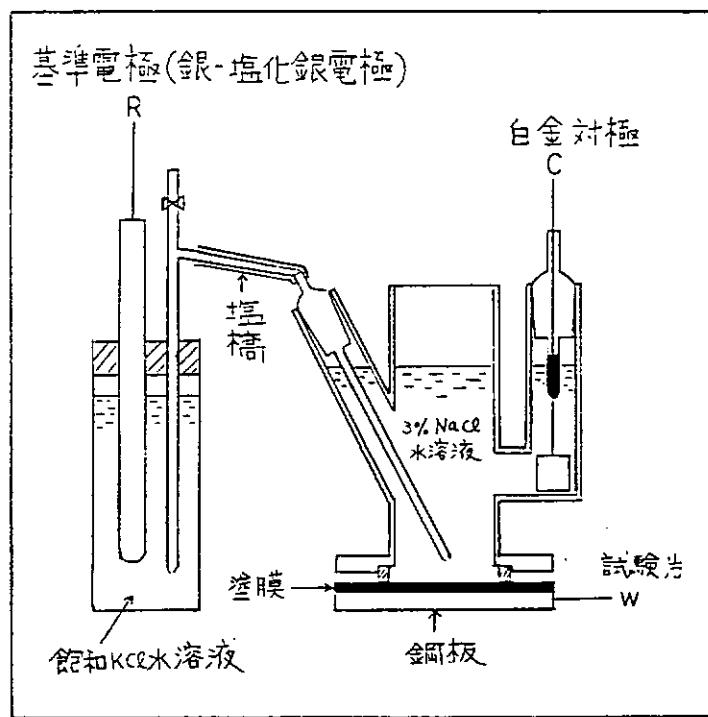


図 3.1.2 測定セルの概要

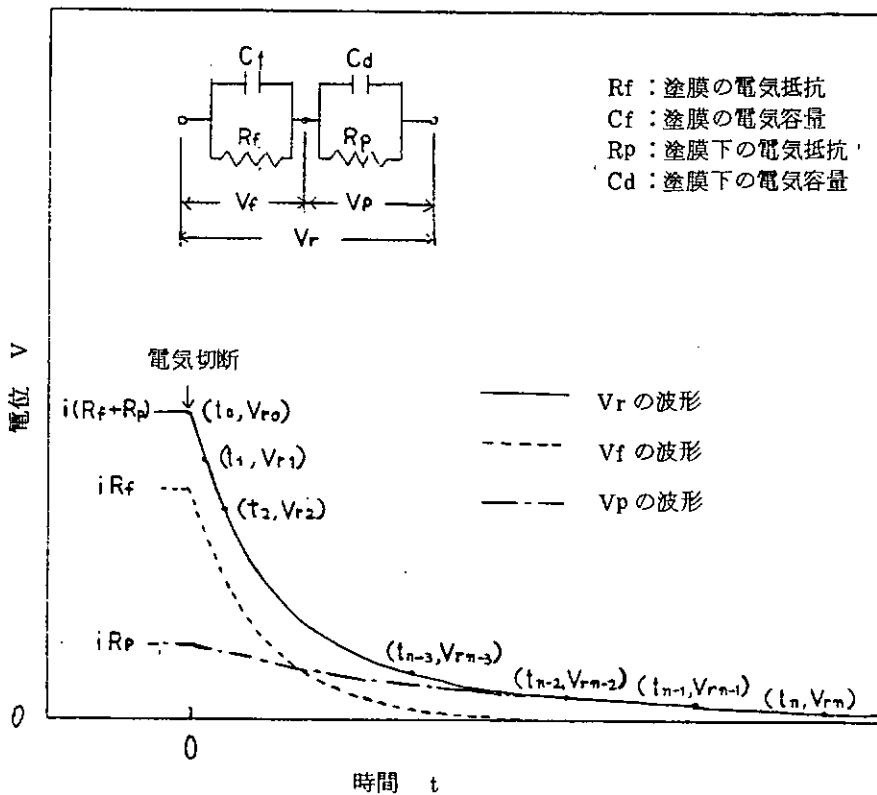


図 3.1.3 定電流 i で試験片を一定時間分極後、電流を切断したとき、X-Tレコーダーで記録される V_r の波形と(1)式、(2)式にもとづいて描いた V_f と V_p の波形

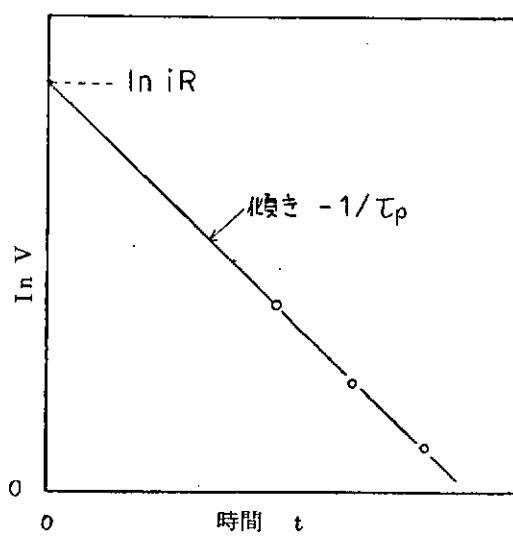


図 3.1.4 時間と電位の対数の関係

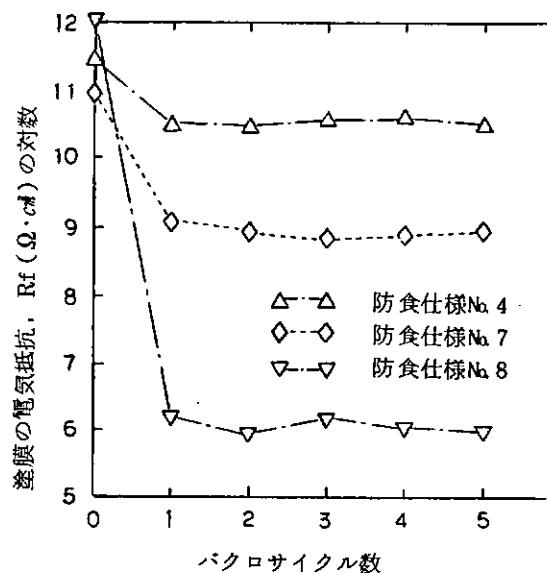


図 3.1.5 標準防食仕様で塗装した試験片の塗膜の電気抵抗の経時変化(パクロA)

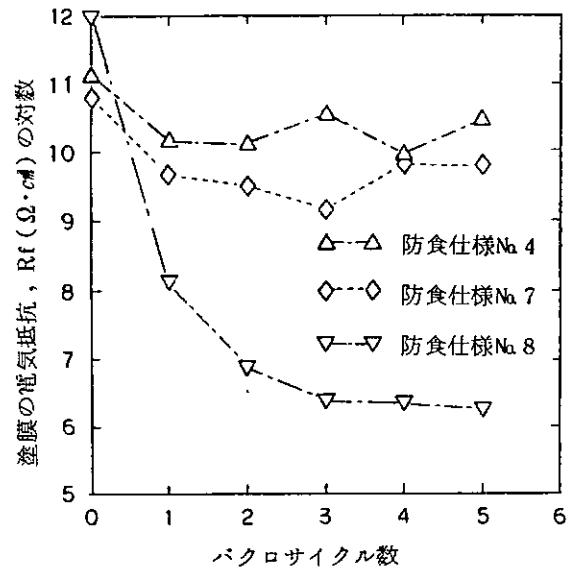


図 3.1.6 標準防食仕様で塗装された試験片の塗膜の電気抵抗の経時変化(バクロB)

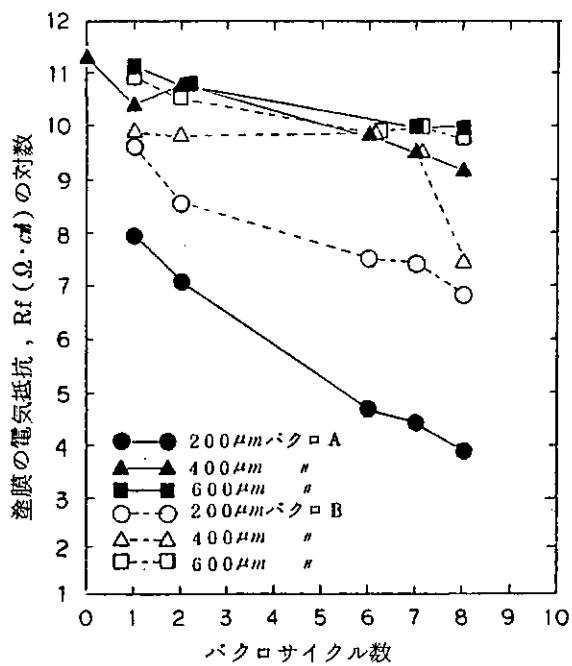


図 3.1.7 TE塗装鋼板の塗膜の電気抵抗と暴露条件及び膜厚との関係
(下地処理: ショットブラスト, ショッププライマーなし)

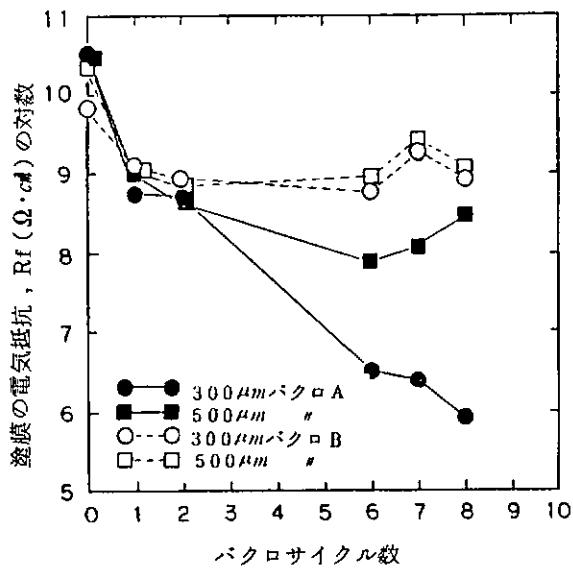


図 3.1.8 P E F 塗装鋼板の塗膜の電気抵抗と暴露条件及び膜厚との関係
(下地処理: ショットブラスト)

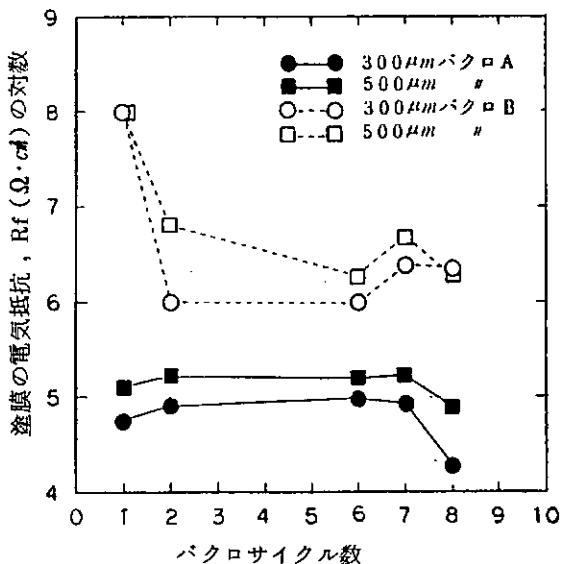


図 3.1.9 E S F 塗装鋼板の塗膜の電気抵抗と暴露条件及び膜厚との関係
(下地処理: ショットブラスト)

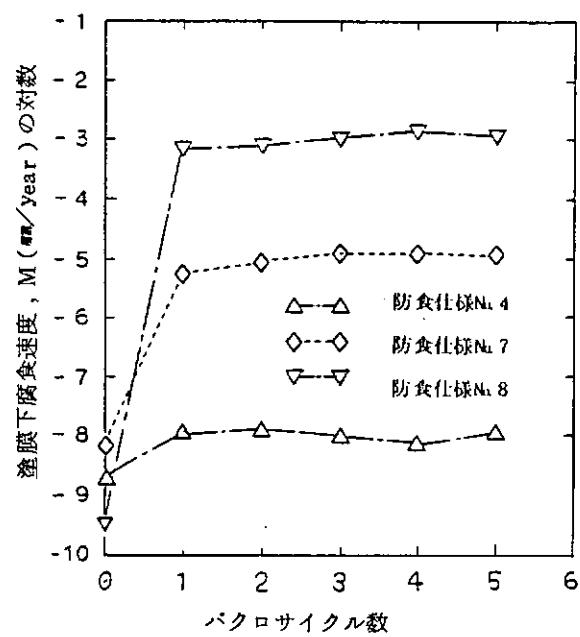


図 3.1.10 標準防食仕様で塗装された試験片の塗膜下腐食速度の経時変化(パクロ A)

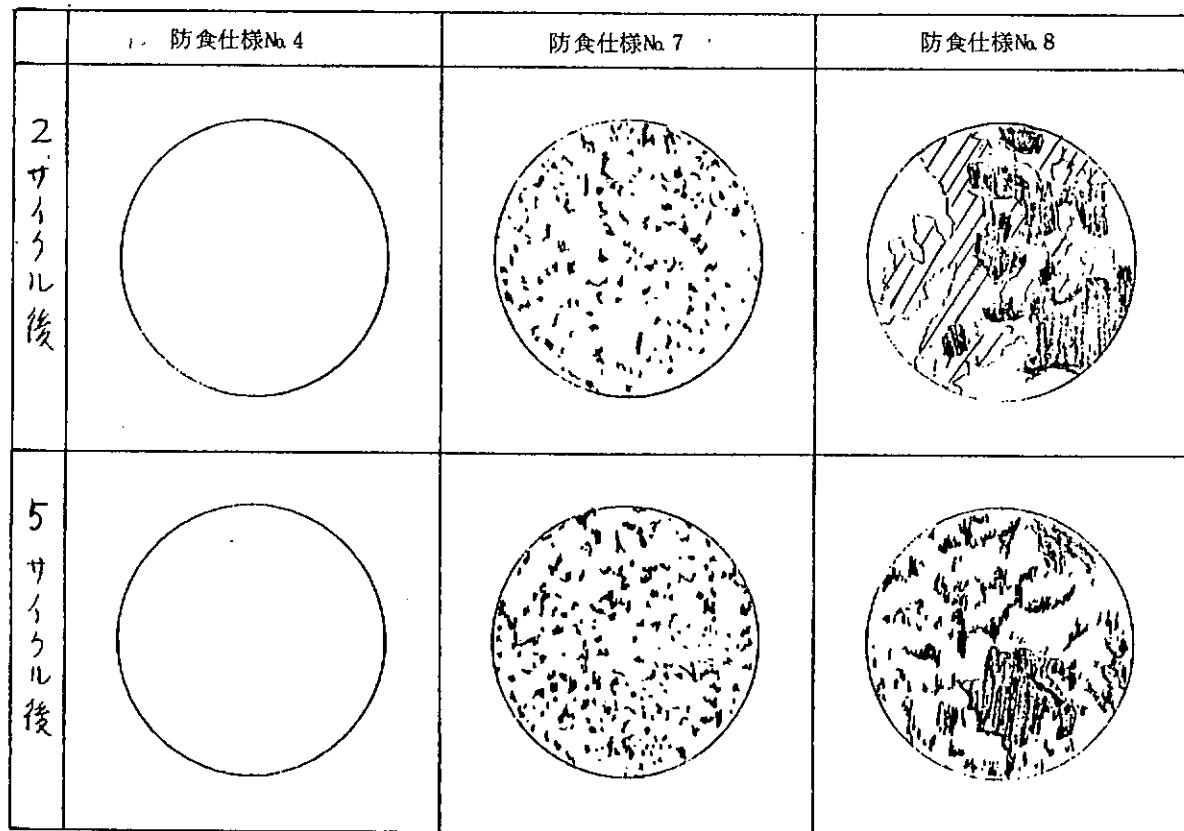


図 3.1.11 塗膜下腐食状態のスケッチ(パクロ A)

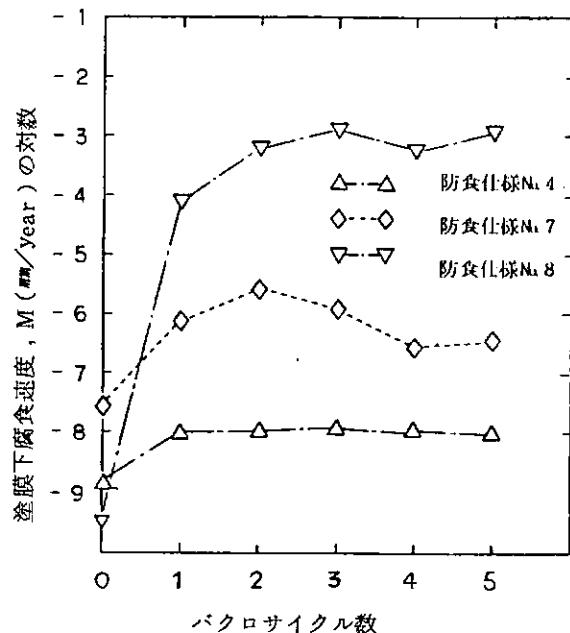


図 3.1.12 標準防食仕様で塗装された試験片の塗膜下腐食速度の経時変化(パクロB)

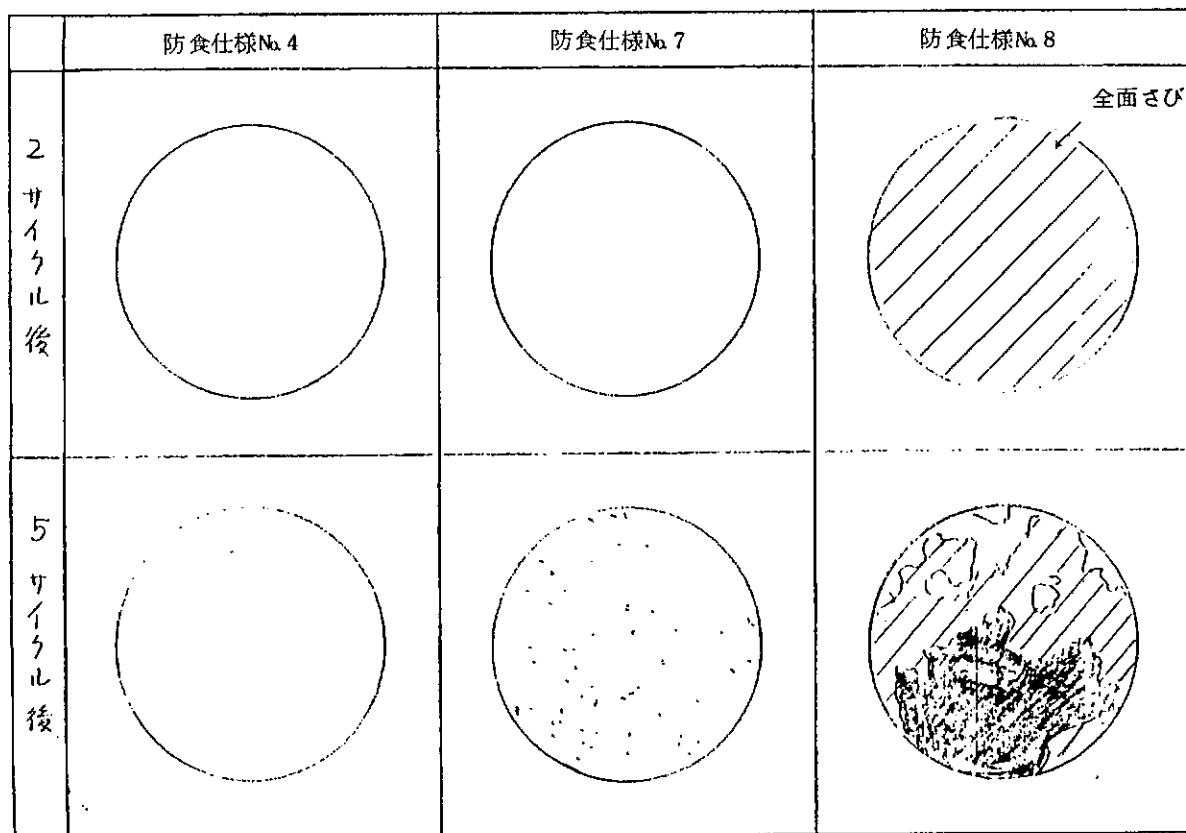


図 3.1.13 塗膜下腐食状態のスケッチ(パクロB)

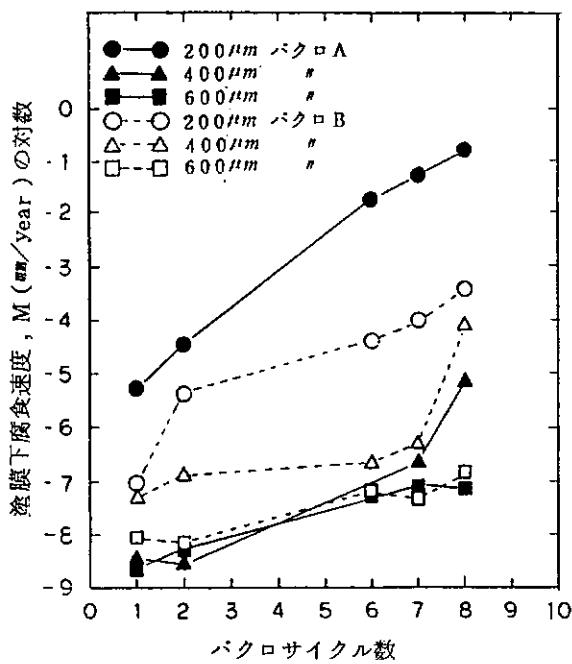


図 3.1.14 T E 塗装鋼板の塗膜下腐食速度と暴露条件及び膜厚との関係

(下地処理: ショットブラスト, ショッププライマーなし)

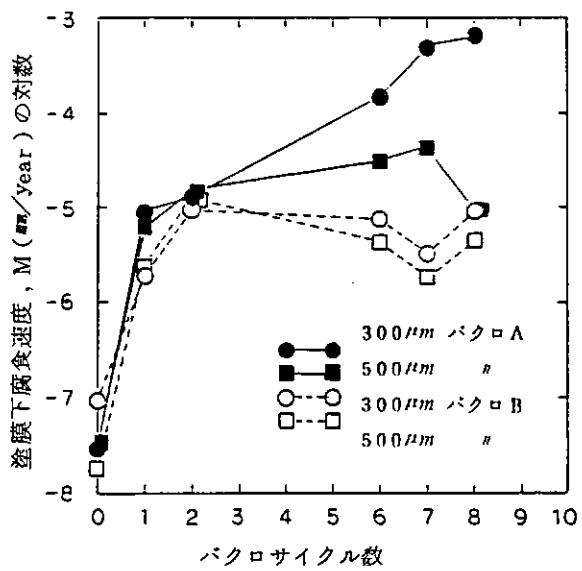


図 3.1.15 P E F 塗装鋼板の塗膜下腐食速度と暴露条件及び膜厚との関係

(下地処理: ショットブラスト)

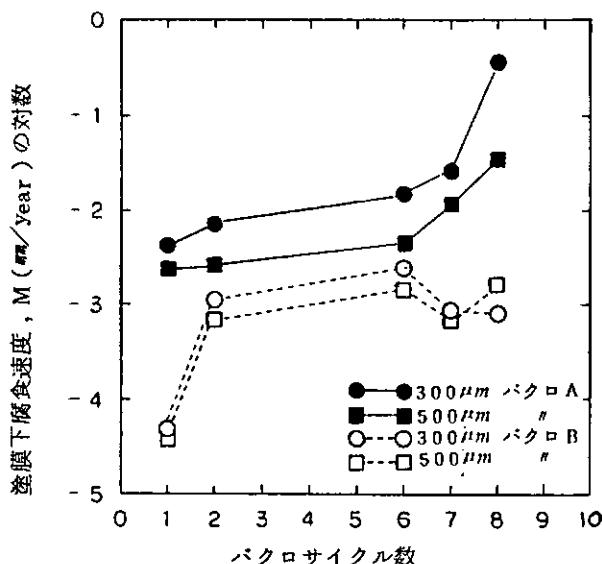


図 3.1.16 E S F 塗装鋼板の塗膜下腐食速度と暴露条件及び膜厚との関係
(下地処理: ショットブラスト)

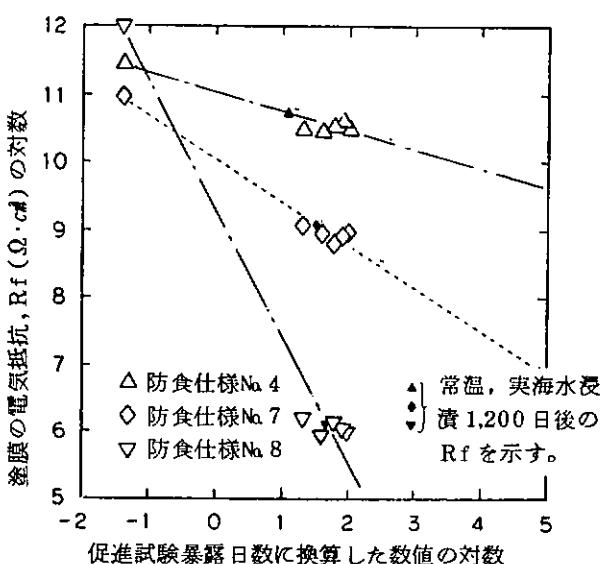


図 3.1.17 標準防食仕様で塗装された試験片の塗膜の電気抵抗と暴露時間の関係
(バクロ A 又はバクロ A に換算)

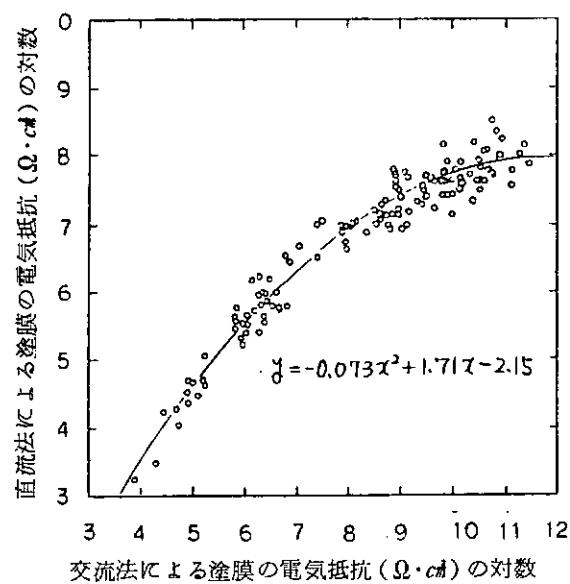


図 3.1.18 直流法による塗膜の電気抵抗と交流法
(1kHz)による塗膜の電気抵抗の比較

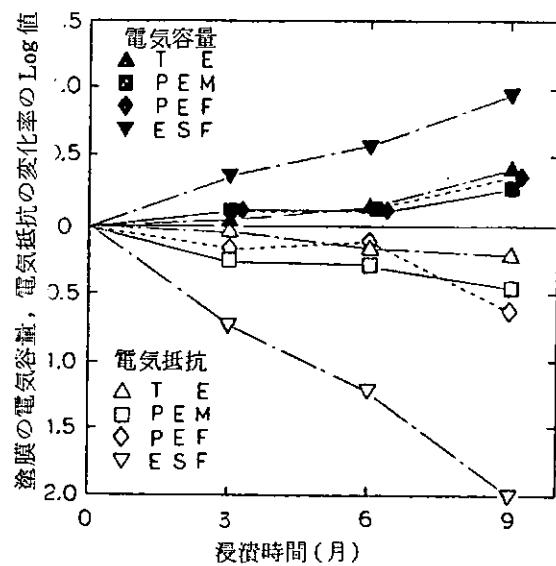


図 3.1.19 海水浸漬による塗膜の電気容量及び
塗膜の電気抵抗の変化率の経時変化
(変化率=浸漬後の値/浸漬前の値)

3.2 防食性評価技術に関する検討

防食材料の劣化判定技術においては、塗膜の特性値が始めから不均一であることが大きな障害となる。すなわち、同じ塗装板であっても場所によって膜厚や強度、電気的特性が異なるためである。これは塗装技術や施工条件で生じる差異であり、それは一般の工学用材料よりも著しく大きい。この差異は試験片の製造ロットが異なると一層大きくなると推定される。

電気的特性の測定のように、非破壊で行える試験では、塗膜の同一箇所で、劣化各段階の物性値を測定することが可能であるが、引張試験や付着力の測定のように破壊試験では、劣化各段階の物性値を塗膜の同一箇所で行うこととは、不可能である。

このような問題は何も寿命推定だけの問題ではなく、本研究で示されているすべての測定値に共通することである。

従って、防食材料の調査における特性値の経年変化といわれるものは、厳密にはある材料の経年変化を示したものとは言い難く、特性値の変化の傾向を示したものと考え方が適切であろう。

塗膜のもつこののような特性のため、測定された特性値そのものを用いて劣化の程度等を判定するよりも、初期値と劣化後の値との相対値を用いて、劣化程度を判定した方が適切であると考えられる。従って、出来る限り各測定値は、初期値との比で表すよう努めた。

3.2.1 防食性評価の手順

船舶では、入渠による検査によって、細部にわたって塗膜の状態を調べ、必要な修理を行うことが可能である。しかしながら、大型海洋構造物の場合は、こうした検査は不可能に近い。そのため、防食塗膜の施工に際しては、事前に十分その防食性を評価しておくことが必要である。

図3.2.1は、塗装仕様を選択する際の流れを示している。欠陥の有無により、流れは2つに分れるがいずれの流れにおいても、暴露される環境における塗膜の劣化速度の推定(図中 I b, II b, II d)が必要である。(図3.2.1)ところが、超長期にわたってメインテナスフリーを目標に開発されている重防食仕様の塗膜については、数年程度の実環境暴露によって、この劣化速度を推定することは困難である。このため促進劣化試験法の開発が必要となる。促進劣化試験法としては、従来、塩水噴霧、温塩水浸漬や紫外線照射との組合せ、乾湿繰返し、温度差水槽浸漬等が行われてきた。ここでは、重防食塗膜であることを考慮して、一層の劣化促進効果が期待できる、水を媒質とした熱冷衝撃試験法を試み、その有効性を調べることとした。

図3.2.1中の(B)に示す欠陥としてはピンホール、しづわ、ふくれ等と同時に塗膜厚の不均一がある。塗膜厚の不均一は、スプレー、コテといった方法により塗装されることから塗布対象が平面である場合でも生ずる。さらに海洋構造物で多用されるパイプ、曲面板やこれら部材間を接合する溶接部分では、曲率等の影響を受けて、塗膜厚の分布は広がることになる。この分布の傾向を知っておくことは、防食性評価、防食性向上の観点から極めて重要となる。そこで平面での塗膜厚分布の性質を知ると同時に曲率を種々変えた半球、円筒についてもその塗膜厚分布の性質を調べ、曲率との関係を検討した。

3.2.2 热冷衝撃による塗膜劣化の促進法

(1) 目的

空気を媒質とする熱履歴を塗膜に加えることにより劣化を促進させる方法については、当研究部会の昭和56年度報告にある。ここでは空気に比し、格段に熱容量が高い水を媒質として用い、塗膜に対し、衝撃的な熱あるいは冷衝撃を加えることにより、塗膜に大きい熱応力を生じさせ、これによる劣化評価パラメーターの変化を測定し、促進劣化法として使えるか否かを検討した。

(2) 実験方法

(a) 検討した防食仕様

使用した防食仕様は、表1.2.2.3に示すものである。

(b) 試験片の作製

試験片は、 $300 \times 100 \times 4$ mm の軟鋼板上に、上記各防食仕様を施工した。仕様A1～A5はエアスプレーにより、また仕様A6～A8はナイフコーティングによって塗装した。

(c) 実験内容

実験には、热水槽及び冷水槽を用意し、試験片をこの2つの水槽に交互に浸漬する。実験パラメーターは、水槽温度、浸漬時間及び浸漬サイクル数(熱、冷両槽への浸漬を1サイクルとする)である。実験は4シリーズ行ったがその実験条件を表3.2.1に示す。(表3.2.1)

劣化の判定は、交流インピーダンス、付着力及び3点曲げによるピンホールの発生と塗膜のはがれによった。

インピーダンス測定は、 50×50 mm アルミ箔電極を塗膜面に糊付けし、誘電体損測定装置(TR1-C型：安藤電気製)により、周波数を $0.11 \sim 10$ KHz の間で5段階にかけ、抵抗(R)と容量(C)を測定し $\tan \delta$ を求めた。RとCの等価並列回路を図3.2.2に示す。(図3.2.2)

付着力の測定には、アドヒージョンテスター(エルコメーター社のModel 106)を用いた。これは、塗膜面にアルミ製のドーリーをエポキシ系接着材で張りつけ、24時間後に、ドーリー周辺の塗膜を素地まで切り取り、ドーリーを直上に引き上げて塗膜を破断させるものである。付着力及び塗膜

の破壊箇所を調べた。図 3.2.3 に試験要領を示す。(図 3.2.3)

曲げ試験は JIS G3492-1977 「水道用鋼管コールタールエナメル塗覆装方法」に示されている塗装試験片の曲げ試験法に準じ、図 3.2.4 に示す要領で行った。試験機としては、5トンのオートグラフ(島津製作所製)を用いた。たわみの測定は、ダイヤルゲージにより行い、ピンホール(割れ)の発生は、適当なたわみ量毎に試験機を止め、ピンホール(TRE-10A型:サンコウ電子研究所製)により5kVで探知した。(図 3.2.4)

(3) 実験結果及び考察

表 3.2.2 及び表 3.2.3 に実験シリーズその 1 及びその 2 の結果を総括したものを示す。表 3.2.2 中の最右欄に記入した「3点曲げ試験におけるピンホール発生の型」は次のように定義する。

I型 - たわみ量 3.8mm になっても、ピンホールが検出されない。

II型 - あるたわみ量でピンホールが検出されるが、その後たわみ量を増加させても、検出数の増加がないか、検出されなくなるもの。

III型 - あるたわみ量でピンホールが検出され、その後はたわみ量の増加につれて検出数が加速度的に増加するもの。(表 3.2.2, 表 3.2.3)

実験シリーズその 3 は、熱水槽の温度をガラス転位点以下にし、しかも熱冷の温度差を大きくするため、冷水槽を液体窒素により冷却したものであるが、熱容量上の制約から期待通りにはいかなかった。しかも温度差を確保するため、連続して 1 つの実験を行わず、途中に中断を置いたこともあり、シリーズその 1, その 2 で得られた以上の結果を得ることは出来なかった。ここでは、仕様版 7 の結果のみを図 3.2.5 に示す。(図 3.2.5)

実験シリーズその 4 は、その 1 を細かく行ったものである。この結果は、3.3 節でエポキシ系塗膜の劣化を考える時、促進劣化法の一つとして熱冷衝撃試験を評価したが、この際にデータとして用いた。

実験シリーズその 1 の熱水槽の温度は、通常のビニール系、エポキシ系塗膜については、そのガラス転移点を越えていることが問題になる。ところが佐藤忠明らによれば、浸漬塗膜のガラス転移点(T_{gw})は、乾燥塗膜のガラス転位点(T_g)より約 3.0°も小さい値となっている。そして、 T_{gw} 以上では、温度-塗膜は離幅、温度-酸素透過度が直線関係となった。この直線関係は T_{gw} 以下でも成立するが、 T_{gw} で折れ曲る。その例を図 3.2.6 に示す。(図 3.2.6)

ビニール系の塗膜の T_g は 60°C、エポキシ系では 50~80°C とすると、 T_{gw} はいずれの場合も 60°C を下回ると考えられるので、実験シリーズその 1, その 2 は同列に考えてよいということになる。

一般に塗膜は、塗布後の養生期間を経由した後に劣化が始まる。これを、次の 4 つの評価パラメーター、即ち抵抗値、容積、付着力、曲げ試験でのピンホール検出の傾向でみると次のようになる。抵抗値は、一旦増加後減少に転ずる。容積値は、一旦減少後増加に転ずる。付着力は、一旦増加後減少に転ずる。曲げ試験でのピンホール検出は前述した型の 0 → I → II で推移するということになる。

図 3.2.6 からもわかるように、 T_g 近傍での温度が塗膜劣化に関係する量に与える影響は極めて大きい。実験シリーズその 1 とその 2 を考えると、両シリーズでは最高温度の差、熱・冷水槽の温度の差とも 40°C であり、「シリーズその 1」の方が「シリーズその 2」に比べ衝撃回数は少ないが、衝撃による効果は大きいことが予想される。この観点から「実験シリーズその 1」の結果(表 3.2.2)を見ると、上記の評価パラメーターにみる変化の傾向は、衝撃回数を時間の経過に置きかえて考えると、明確、不確かな差はあるが、実現されている。特に明確なのが仕様版 3 の場合である。これは無機ジンク塗料の下塗りがなくエポキシのみの塗膜であるためと考えられる。

表 3.2.3 の場合(実験シリーズ「その 2」)は、表 3.2.2 の場合に比べ劣化の傾向は「シリーズその 1」ほどには明確でないが、大きくみれば上記の劣化傾向に従っているといえる。

図 3.2.5 に示すのは、実験シリーズ「その 3」の結果のうち、ライニング系の仕様版 7 のものである。エポキシ系ではあるが実験した他の仕様(仕様版 1 ~ 仕様版 5)の膜厚に比べ、著しく厚い(目標膜厚

* 佐藤忠明、西本忠史、木暮英雄「塗膜による防食」金属表面技術 vol.35, no.3 (1984) PP134-139

値で3倍以上である)にもかかわらず、評価パラメーター中抵抗(図中(a))、付着力(図中(d))の変化は劣化の一般傾向と一致している。容量については、あまり変化が見られないが、これは膜厚が極めて厚いため変化がかくされてしまうからとも考えられる。 $\tan \delta$ については、従来も明確な傾向が得られていないが、ここでは結果を示したに留める。

(4) 得られた結論

6種の塗装仕様につき熱冷衝撃による促進劣化試験を行い、次の結論を得た。

- 1) 衝撃回数を劣化時間に対応させて考えると、熱冷衝撃試験により劣化した塗膜の評価諸パラメータ一間には、実環境暴露によって得られると同様の相関関係が認められた。
- 2) 評価パラメーターとして力学的(付着力、曲げ)、電気的(インピーダンス)な量をとっていることから、本試験法が極めて短時間に、大きい促進効果をもつ試験法である可能性が示された。
- 3) 塗膜ガラス転移点は水への浸漬により低下するが、その低下したガラス転移点以上の温度で試験することにより劣化の促進効果を一層高めることが可能となることがわかった。

3.2.3 塗膜厚分布の特性

(1) 目的

塗膜が所期の性能を十分発揮するための必要条件の一つとして、膜厚が均一であることがあげられる。塗膜厚が薄すぎることも、又厚すぎることも欠陥の一つと考えられるからである。ここでは、平面に塗布された塗膜の膜厚分布を調べ、次いで曲率(寸法)の異なる半球及び円筒に施工した塗膜について、その膜厚分布を調べ、曲率と膜厚分布の関係に考察を加えた。

(2) 実験方法

(a) 平板に塗装した場合

平板についての塗膜厚分布は、3.2.2節で用いた試験片で調べた。1枚の試験片について、表裏各3点(仕様No.6及びNo.8を除く)で膜厚を測定した。表3.2.4IC(表3.2.4)仕様番号と測定点(データ数)を示す。

膜厚の測定は仕様No.6及びNo.8を除き電磁式厚さ計(Minitest FD-digital: Electro-physik社製)を用いた。仕様No.6及びNo.8はマイクロメーターによった。

(b) 曲面板に塗装した場合

曲面板については、直径Dを48.6mmから355mmの間で7通りにかえた半球、及び円筒(図3.2.7(a)(b)参照)に(図3.2.7)防食仕様No.5を塗布し、合計乾燥膜厚を測定した。半球では緯度線(半球を地球の南半球と考える)及び経度線を10°毎に引き、その格子点で膜厚を測定した。円筒では、周方向の10°毎に軸方向に線を引き、軸方向には20mm毎に円周線を引いてその格子点で測定した。試験体ごとの測定点数は同数とした。

(3) 実験結果及び考察

(a) 平板に塗装した場合

平面の場合について、統計諸量を仕様No.1～5に対し示したのが表3.2.5である。この表から、塗膜の変動係数(表3.2.5) σ/t_m (σ —標準偏差、 t_m —平均値)は、8.2～13.2%であることわかる。しかも平均膜厚 t_m の目標膜厚からのずれも+22%～-6%と大きいことから、実際の膜厚の目標膜厚からのずれは、可成り大きいことになる。

図3.2.8(a)～(d)は、防食仕様No.1、3、5及び6の膜厚(図3.2.8)データに対し、次式の正規分布あてはめを行ったものである。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

ここで示した膜厚は、塗膜面を一定間隔毎にとり、その点の膜厚であった。しかし、実際の塗膜面は連続的に変化しており、その変化も重要である。図3.2.9はピンホールのあることがピンホール検出器により検出された塗膜面の起伏状態を示す（東京精密製の三次元表面粗さ形状測定器による）。中央上部の2つの山がピンホールである。ピンホールは、測定器の触針の形状からくる制約のため示されていないが山の頂天にある。山の裾野は広い範囲で凹んでいる。この関係は注目に値する。

(図3.2.9)

(b) 曲面板に塗装した場合

曲面板については、半球の場合の概略の膜厚と位置の関係を図3.2.10に示す。また図3.2.11は同じく半球の場合の膜厚の頻度分布を示す。同一緯度毎の頻度分布と、全体の頻度分布が重ねて記入してある。(図3.2.10, 図3.2.11)

円筒の場合について、同様な図を図3.2.12及び図3.2.13に示す。(図3.2.12, 図3.2.13)

半球の場合(図3.2.10参照)，直径Dの増加につれ、北緯30°近辺の膜厚が他に比し厚く、北極及び赤道近辺では薄くなる。赤道付近は、先行塗りをはけにより行ってあるにもかかわらず薄い。Dがさらに増加すると、上記傾向に加え、緯度による膜厚の違いも加わり、立体表示は鞍形になっている(D=355mm)。これを膜厚の頻度で示した図3.2.11で見る。同一緯度上の頻度分布は、狭い範囲のものであるが緯度が高くなるに従って、平均値が移動し、全体としての分布は幅の広いものとなる。

円筒の場合は(図3.2.12参照)，スプレーが軸方向に移動した影響を受けて、軸線沿いには比較的均一な膜厚を示すが軸線の移動につれ膜厚が大きく変る。変り方は、Dの増加につれ大きくなる。図3.2.13は、周方向30°毎に円筒を1/2に区切った円弧を帯びた短冊状の各部分での膜厚の頻度分布及び円筒全体での頻度分布を示す。半球の場合ほど明瞭ではないが、各部分の頻度分布が狭い範囲にあり、周方向への移動につれ分布の平均値が移動し、全体としての分布は広い範囲になることがある。

膜厚分布の広がりの程度を変動係数 σ/t_m で代表させる。曲率と、 σ/t_m の関係を知るために横軸に半球、円筒の直径Dをとり、縦軸に σ/t_m をとって示したのが図3.2.14である。Dの小さいところと大きいところで σ/t_m が大きく、中間のDで小さい。これは、次のような理由によると考えられる。即ち σ/t_m は次の関数で表わせる。

$$\sigma/t_m = f(D/2, \theta, a_d, N, X) \quad (3.2.1)$$

ここで θ = 塗膜面の絶対傾斜角

a_d = 塗膜厚1データ当たりの塗膜面の面積

N = データ総数

X = その他の要因

ここでは、Dに関係なく N = const, X = const としているので

$$a_d \propto (D/2)^2$$

となる。そこで(3.2.1)式は

$$\sigma/t_m = f(D/2, (D/2)^2, \theta) \quad (3.2.2)$$

となる。(3.2.2)式で、D/2による影響は、Dが増大することにより曲面は平面に近づくことから、fがD/2の減少関数として働くよう作用すると考えられる。一方、(D/2)²の影響は、a_dの影響であるからfが(D/2)²の増加関数として働くよう作用すると考えられる。そこで $\theta = \text{const}$, Nに対するfとDとの関係は、概念的に図3.2.15となる。この図から(図3.2.15), 図3.2.14のθ, (緯度)=const.での $\sigma/t_m - D$ 関係を理解することができる。

図3.2.14中 $\theta_c = 30^\circ \sim 80^\circ$, D=100~300mmに対する σ/t_m は比較的小さい。Dが大きい部分で σ/t_m が増大するのは、先の考察から計測方式(測定点をconstにしてること)によるもの

であることがわかるが、 D が小さい部分での σ/t_m の増大は、曲率の影響を直接受けたものである。これは、 $\theta_\ell = 10^\circ \sim 20^\circ$ で D の全域にわたり、 σ/t_m が大きい値となっていることとも関係がある。それは、半球が $\theta_\ell = 0$ で平面と接し、溶接されているため、折れ曲り部の影響が入ったためと考えられるからである。さらに、半球の全域での σ/t_m 分布（図 3.2.1.4 で大丸で示す）は、 $\theta_\ell = 30^\circ \sim 80^\circ$ の σ/t_m の 2 倍近くあり、 $\theta_\ell = 10^\circ \sim 20^\circ$ と同一水準であり、曲率をもつ面の変動係数が平面の場合に比べ、大きくなることがわかる。（ $D = 100 \sim 300 \text{ mm}$ で、全域での σ/t_m の値は、10% ~ 14% と、平面での σ/t_m の 8.2% ~ 13.2% と同程度のように見えるが、1 データ当たりの面積 a_d が半球では、0.23 ~ 1.2 cm^2 であるのに対し、平面では 100 cm^2 であることを考えると、上記の結果となる）

(4) 結論

平面及び曲面の膜厚計測を行い解析した結果、以下の結論を得た。

- 1) 平面上に塗布された塗膜厚さの頻度分布は、ほぼ正規分布に従う。100 cm^2 当り 1 点の厚さ計測により得られるデータの変動係数は、塗装仕様により異なるが、8% ~ 13% 程度である。
- 2) 曲率をもつ面上に塗布された塗膜は、曲面の位置により、その膜厚に影響を受け、平面の場合に比べ、変動係数は大きな値となる。半球の場合、0.23 ~ 1.2 cm^2 当り 1 つのデータで、変動係数は 10% ~ 14% であった。
- 3) 曲率半径が小さくなると、変動係数は極端に増大し、欠陥の生ずる危険は増大する。

表 3.2.1 热冷サイクル試験条件

実験シ リーズ	熱冷サイ クル回数	供試試験片番号	冷 パス			熱 パス		
			浸漬時間 (目標) sec	初期 温度 ℃	最終 温度 ℃	浸漬時間 (目標) sec	初期 温度 ℃	最終 温度 ℃
そ の 1	10	1-40, 2-19, 3-17 4-17, 5-17	20	2.5	5.0	40	95.0	90.0
	20	1-41, 2-17, 3-19 4-19, 5-15	30	0.0	4.0	30	95.0	85.0
そ の 2	10	1-38, 2-23, 3-20 4-20, 5-20	10	0.5	4.0	10	61.5	58.6
	20	1-42, 2-24, 3-21 4-21, 5-21	10	0.5	4.0	10	61.5	58.6
	30	1-43, 2-25, 3-22 4-22	10	0.5	3.0	10	62.0	58.8
	40	1-148, 2-26, 3-23, 4-23	10	1.0	1.9	10	62.3	59.7
	50	1-149, 2-27, 3-24, 4-24	10	0.0	1.0	10	62.5	59.1
そ の 3	10	1-1001/1002, 3-39/40 5-1001/1002, 7-24/25	30	-10	-3	30	60	59
	30	1-1003/1004, 3-43/44 5-1003/1004, 7-26/27	30	-7	0	30	60	52
	50	1-1005/1006, 3-45/46 5-1005/1006, 7-28/29	30	-13	0	30	58	54
	70	1-1007/1008, 3-47/48 5-1007/1008, 7-30/31	30	-13	0	30	62	54
	100	1-1009/1010, 3-49/50 5-1009/1010, 7-32/33	30	-3	6	30	61	59
そ の 4	3	3-29/30 4-37/38	30	0	0	30	98	98
	6	3-31/32 4-41/42	30	0	3	30	98	96
	10	3-33/34 4-43/44	30	0	2	30	98	95
	20	3-35/36 4-45/46	30	0	4	30	99	92

表 3.2.2 热冷衝撃 実験シリーズその 1 総括

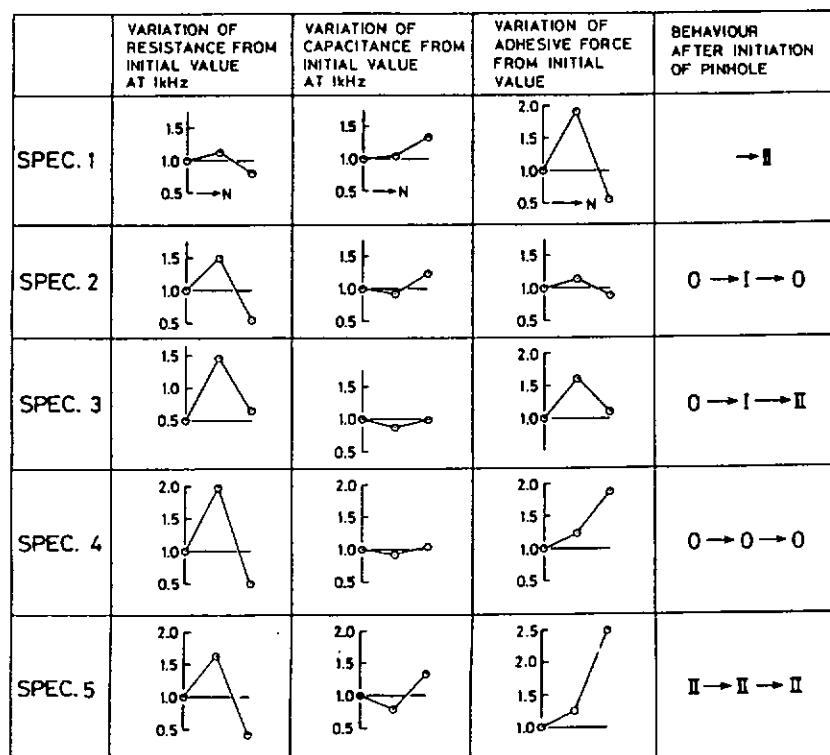


表 3.2.3 热冷衝撃 実験シリーズその 2 総括

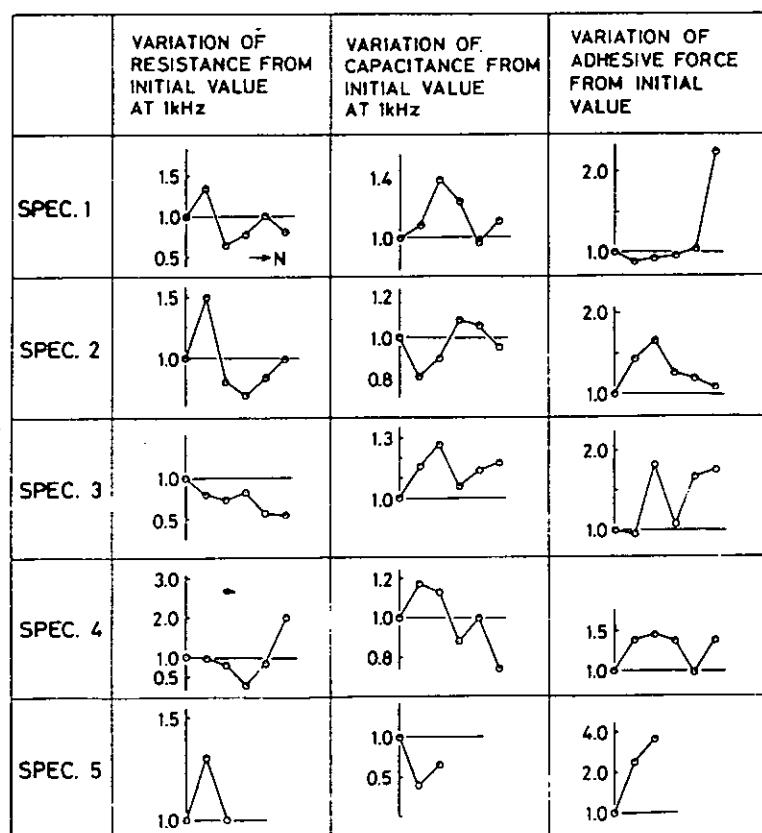


表 3.2.4 塗膜厚測定点数(平面)

仕様番号	試験片枚数	測定点	備考
1	198	1188	表裏各3点
2	50	300	同上
3	50	300	同上
4	50	300	同上
5	50	300	同上
6	50	150	表裏の平均を測定
7	50	300	表裏各3点
8	50	150	表裏の平均を測定

表 3.2.5 塗膜厚の統計値(平面)

SPEC. NO.	1	2	3	4	5
SAMPLE NUMBER	1188	300	300	300	300
TARGET OF TOTAL THICKNESS $t^*(\mu m)$	350	325	380	400	275
MEAN THICKNESS $t_m(\mu m)$	428	376	410	436	258
STANDARD DEVIATION $\sigma(\mu m)$	41.5	44.5	33.5	57.5	26.0
t_m/t^*	1.22	1.16	1.08	1.09	.937
σ/t_m	97.1 $\times 10^{-3}$	118 $\times 10^{-3}$	81.8 $\times 10^{-3}$	132 $\times 10^{-3}$	101 $\times 10^{-3}$

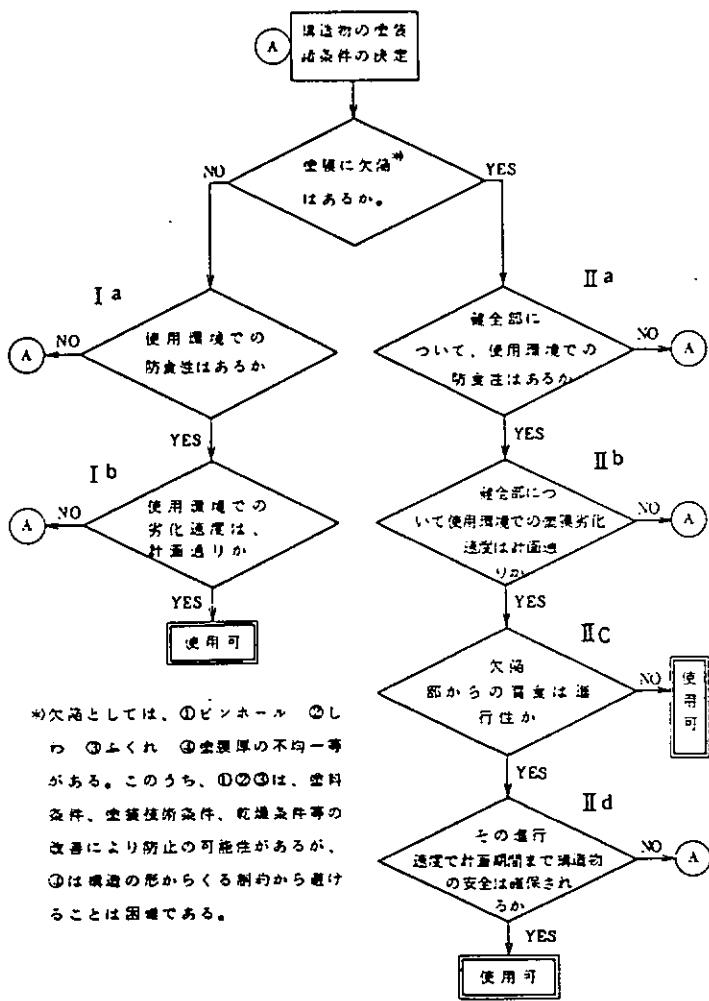


図 3.2.1 塗装仕様選択の流れ図

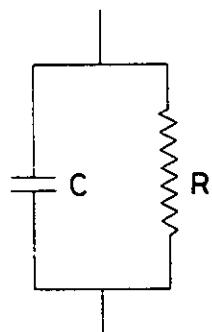


図 3.2.2 抵抗 (R) と容量 (C) の等価並列回路

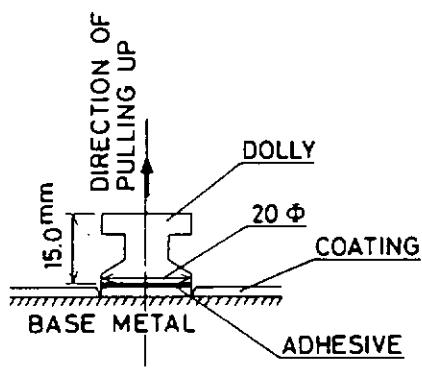


図 3.2.3 付着力測定要領

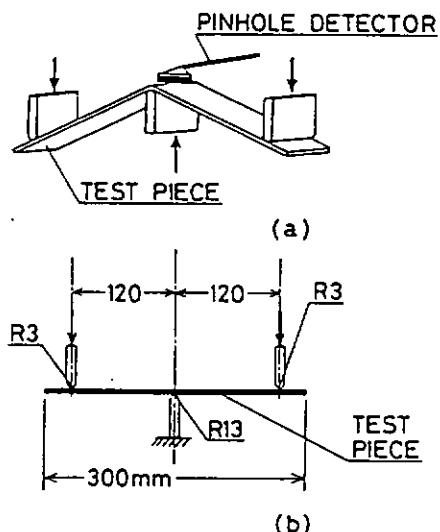
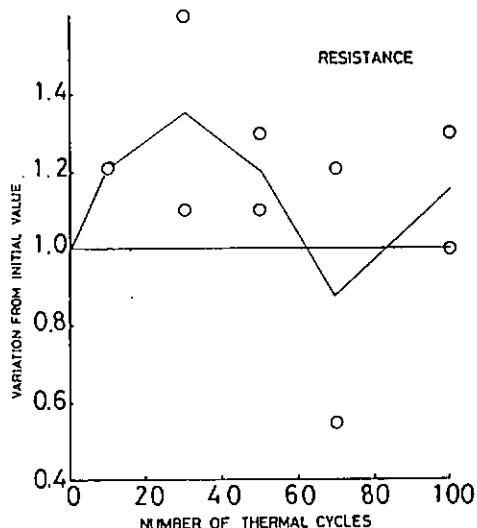
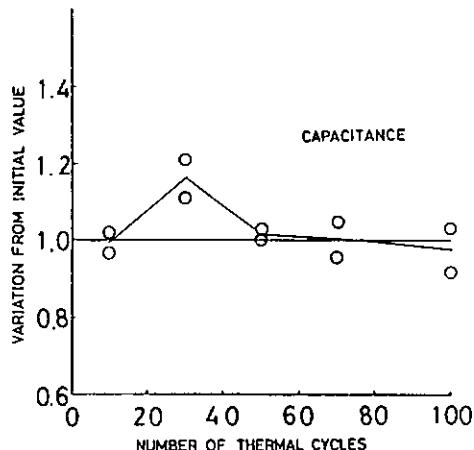


図 3.2.4 3点曲げ試験要領

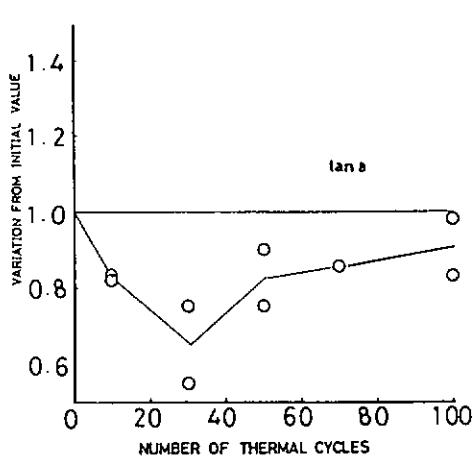


(a) 抵抗

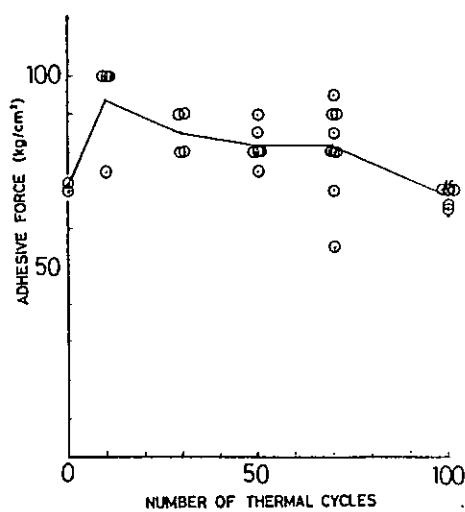


(b) 容量

図 3.2.5 热冷衝撃その3における測定値の変化(仕様7)

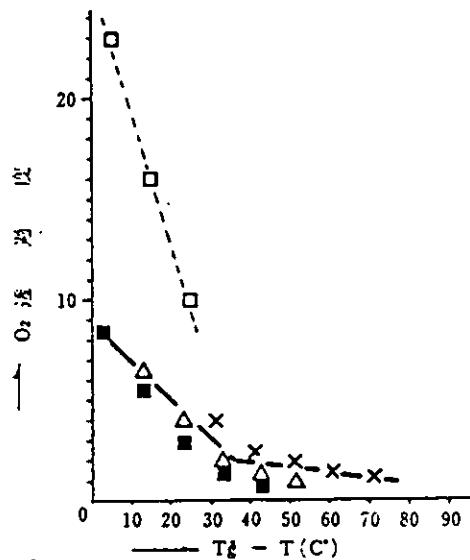


(c) $\tan \delta$



(d) 付着力

図 3.2.5 (続き)



エボオキシ樹脂塗膜の酸素透過速度と測定温度

膜厚: 20~30μm

試料の T_g : □: 55°C, ■: 73°C, △: 83°C,

×: 101°C

透過度: 数値が大なるほど透過速度大(透過速度に比例)

図 3.2.6

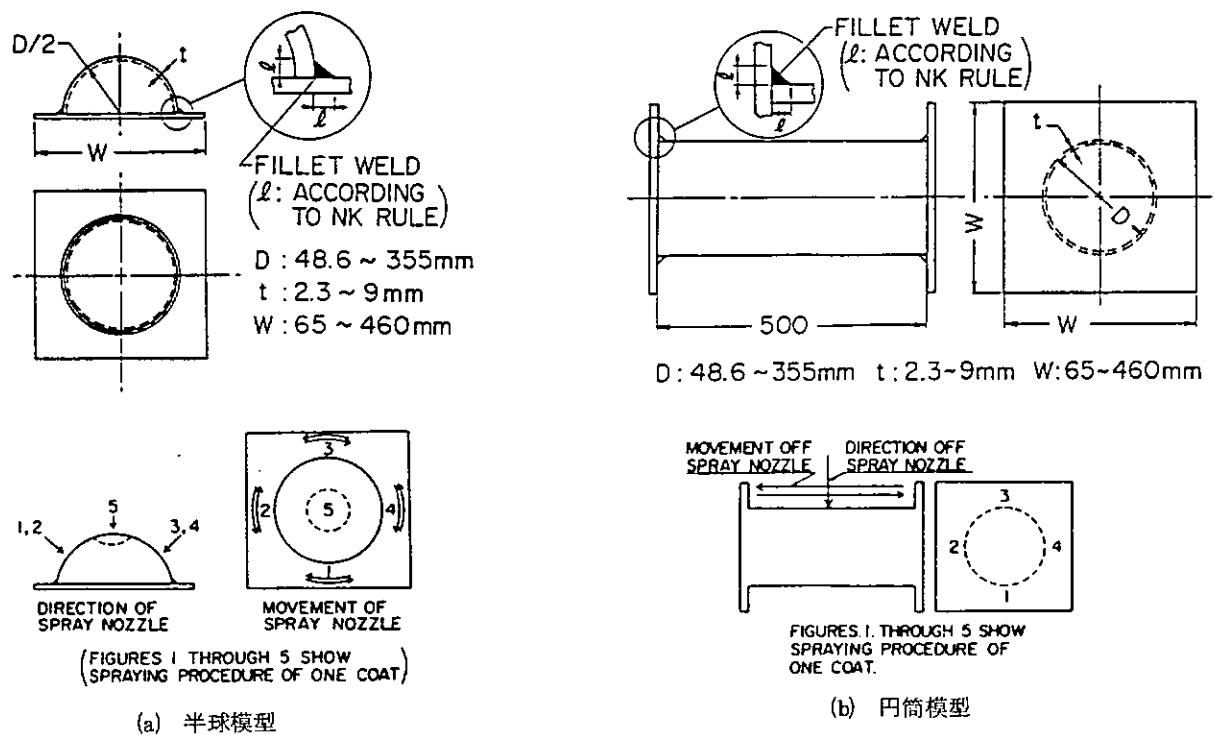
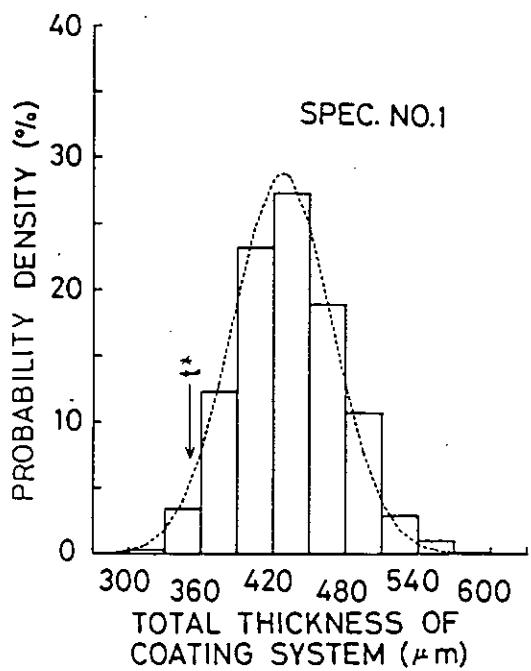
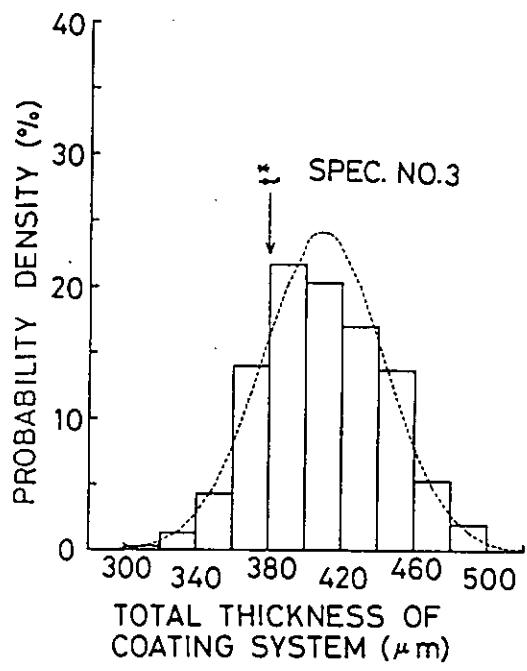


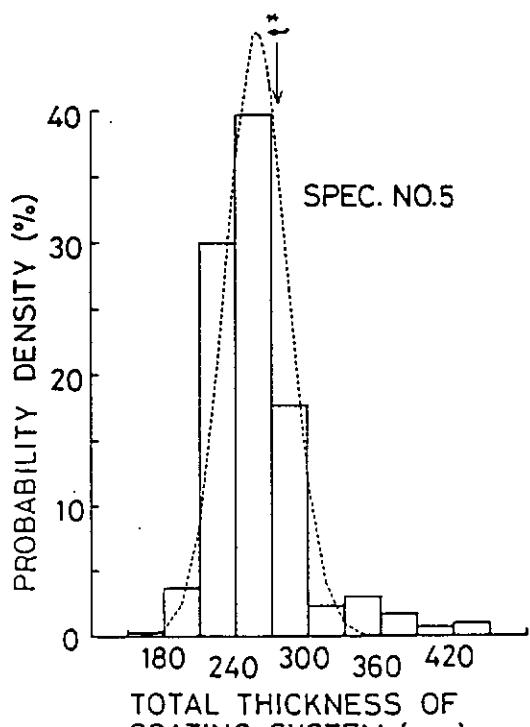
図 3.2.7 半球及び円筒模型とスプレー方向



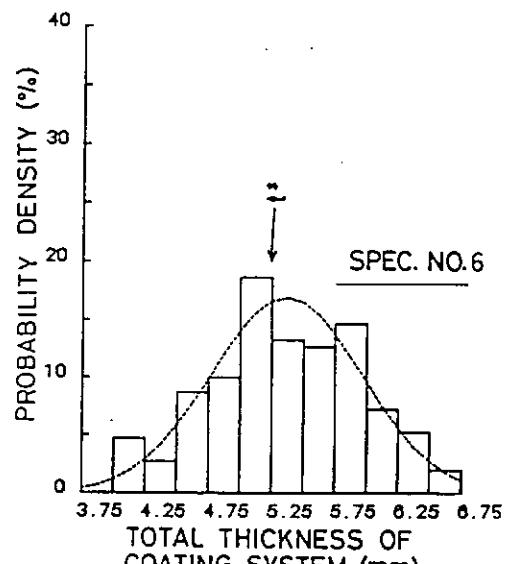
(a) 仕様No. 1



(b) 仕様No. 3



(c) 仕様No. 5



(d) 仕様No. 6

図 3.2.8 膜厚分布

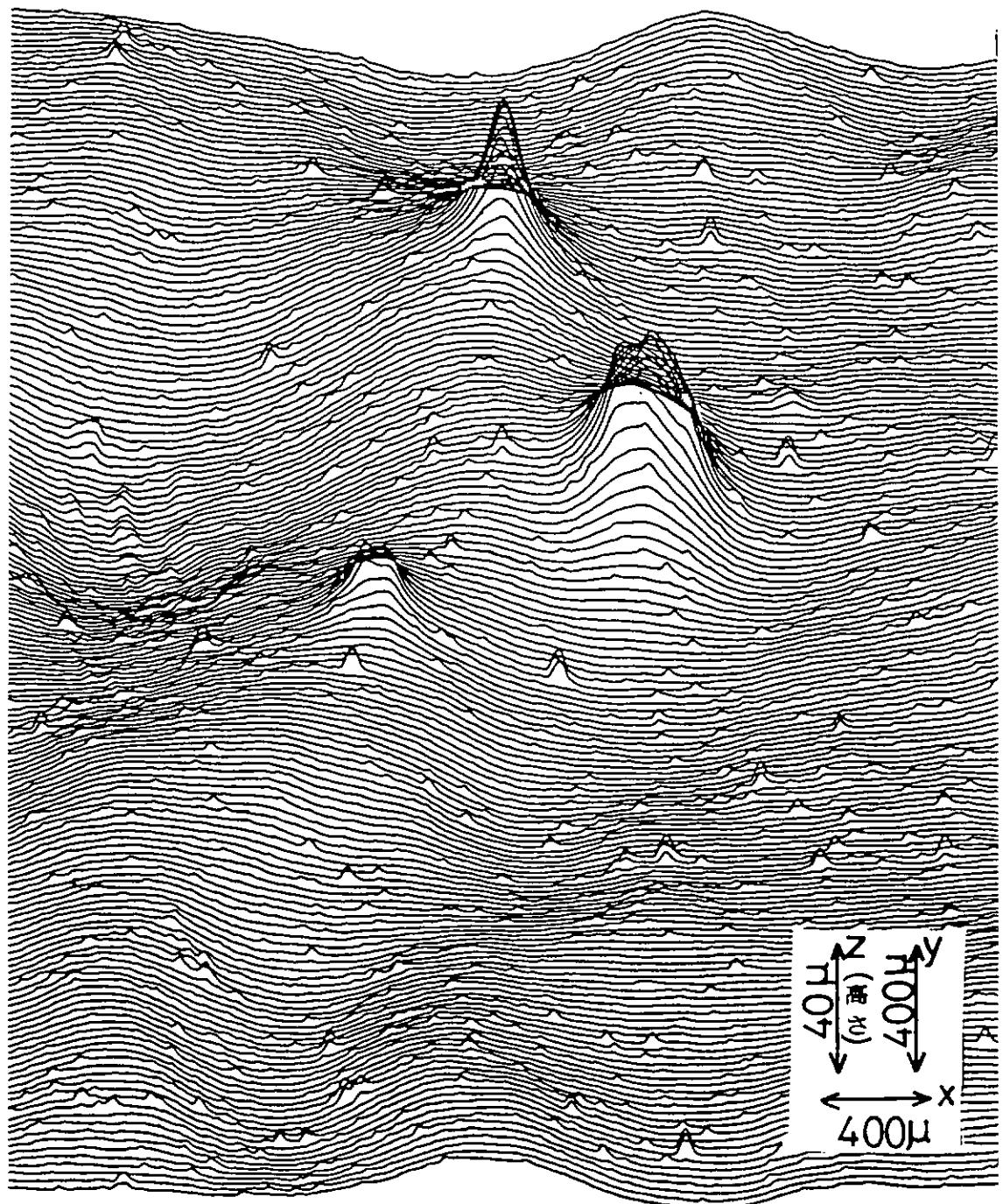


図 3.2.9 塗膜欠陥部の形状 (仕様No.1)

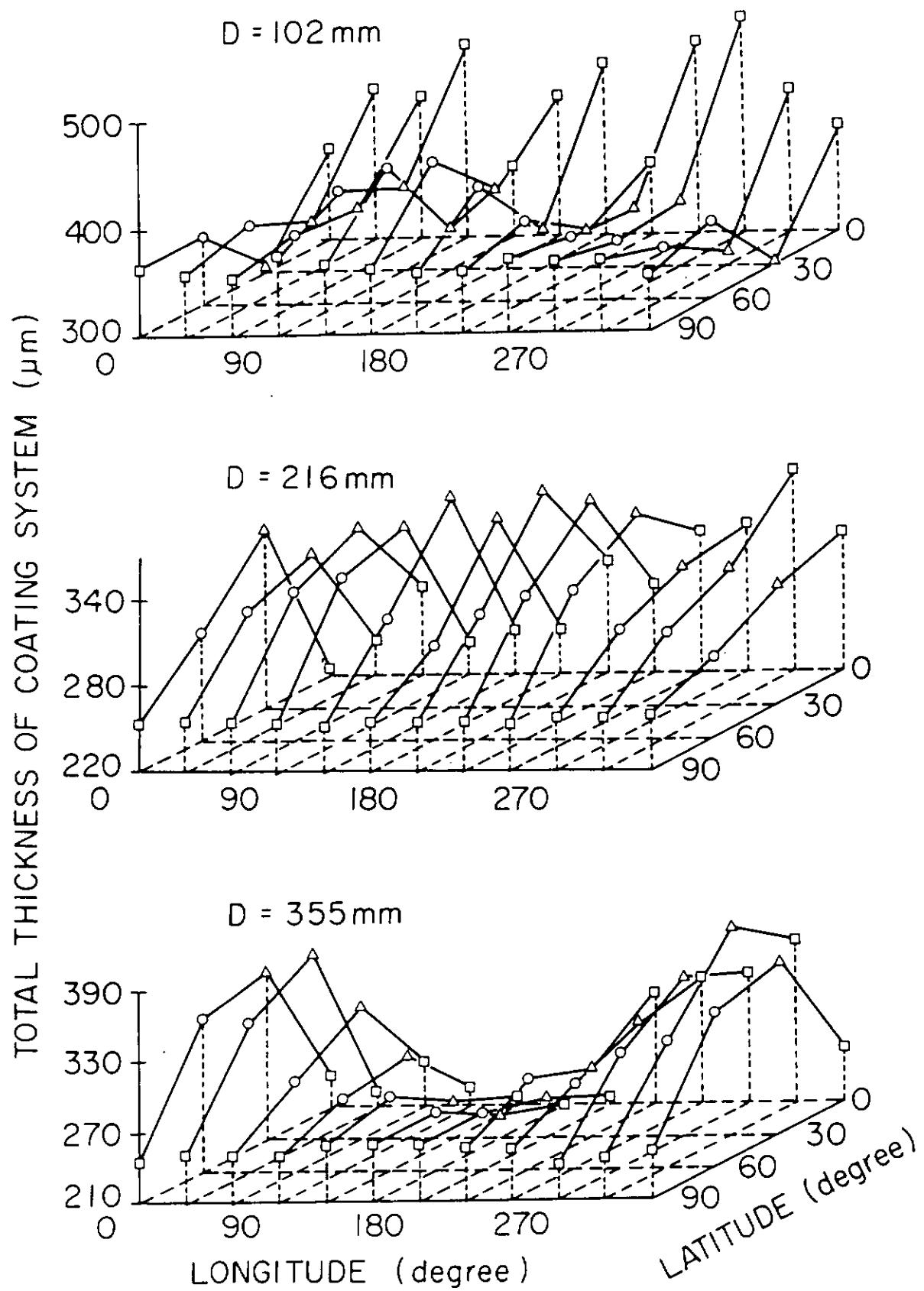


図 3.2.10 半球上の塗膜厚分布. (仕様No.5)

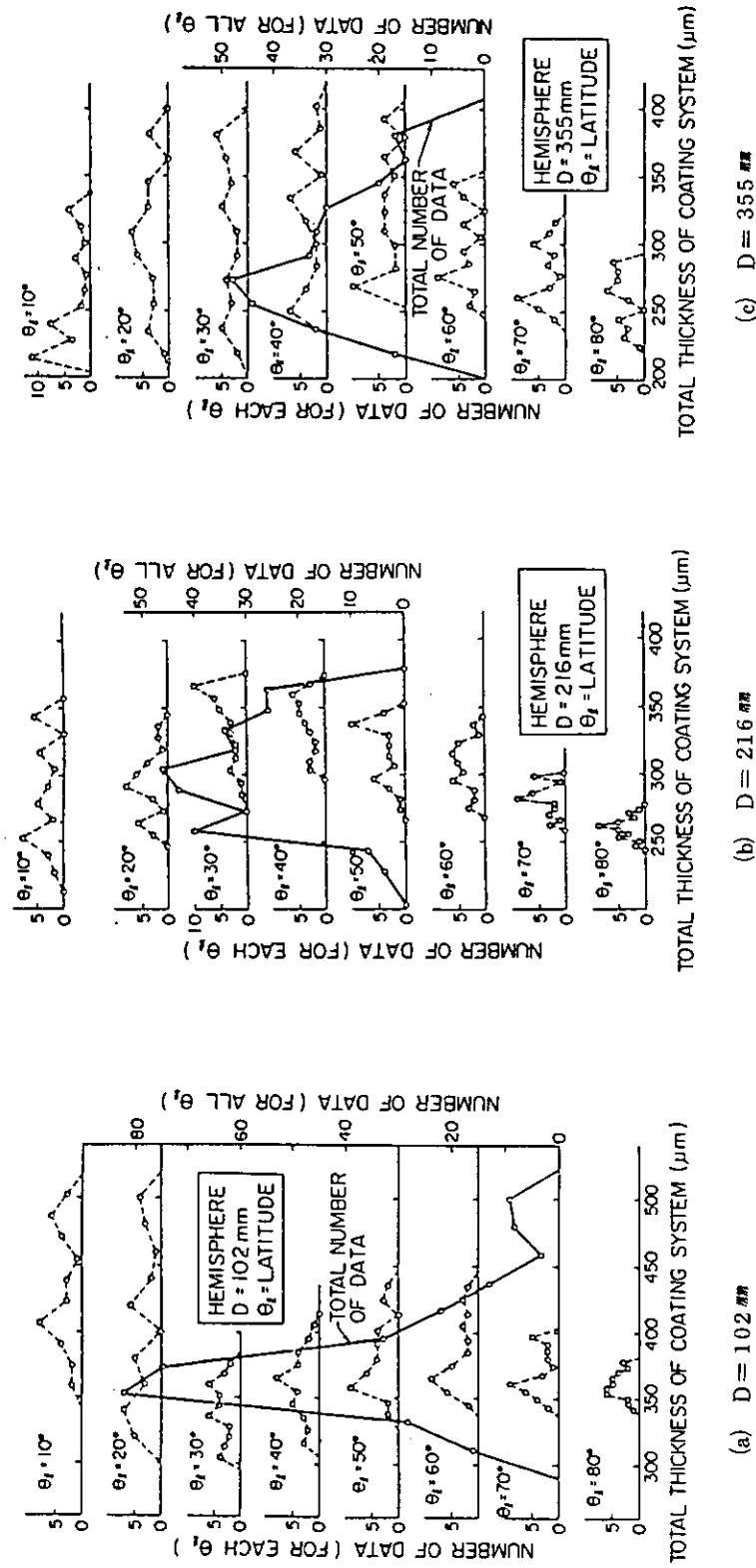


図 3.2.11 半球上の塗膜厚の頻度分布（仕様No.5）

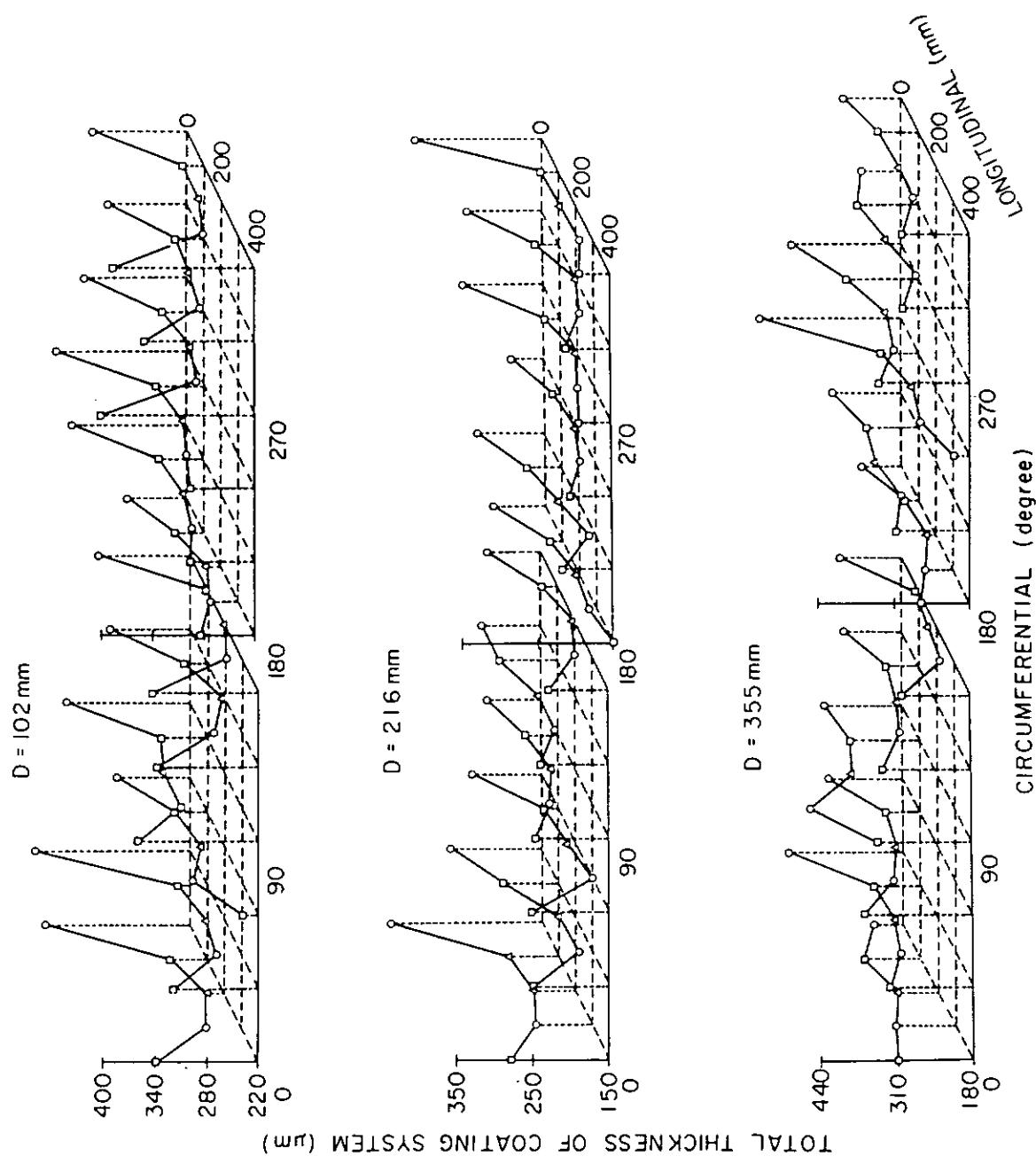


図 3.2.12 円筒上の塗膜厚分布（仕様No.5）

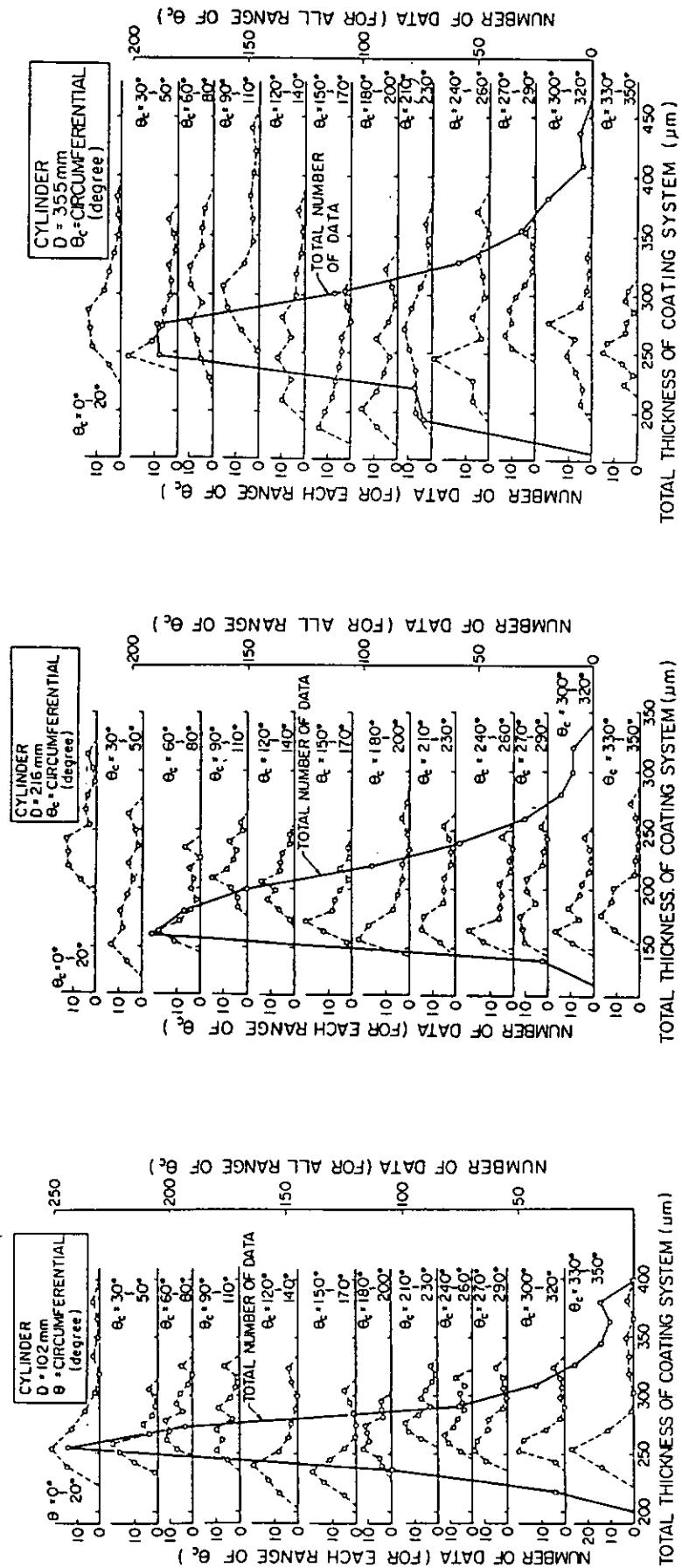


図 3.2.13 円筒上の塗膜厚の頻度分布（仕様No.5）

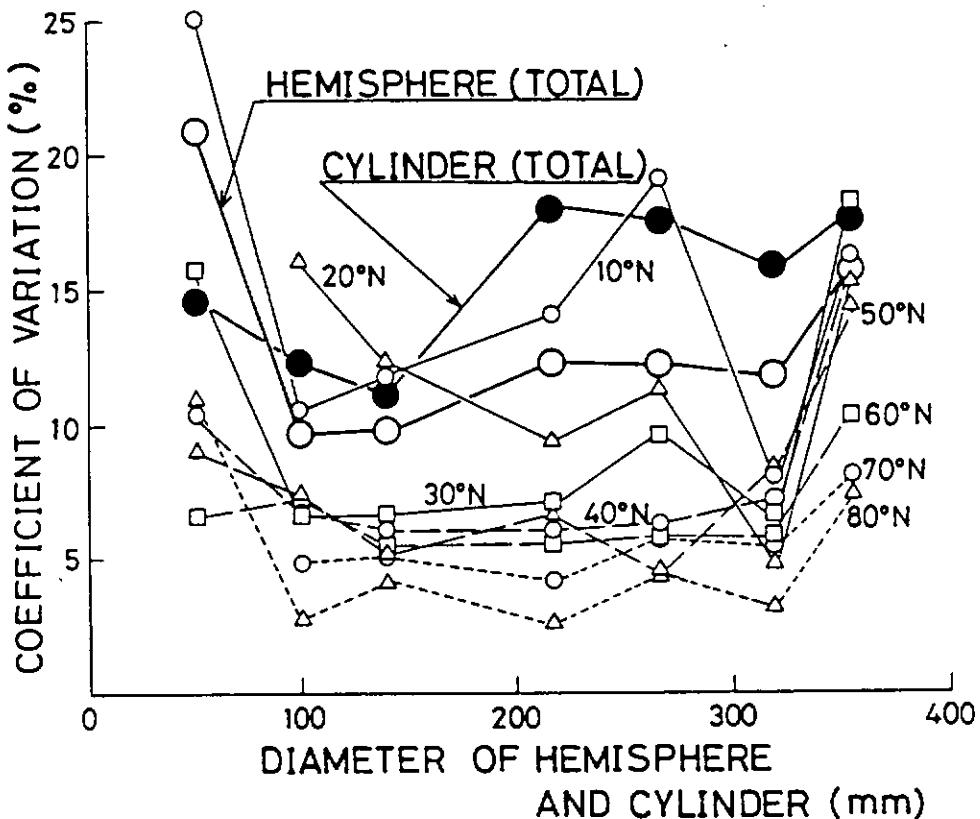


図 3.2.14 変動係数と半球及び円筒の直径との関係

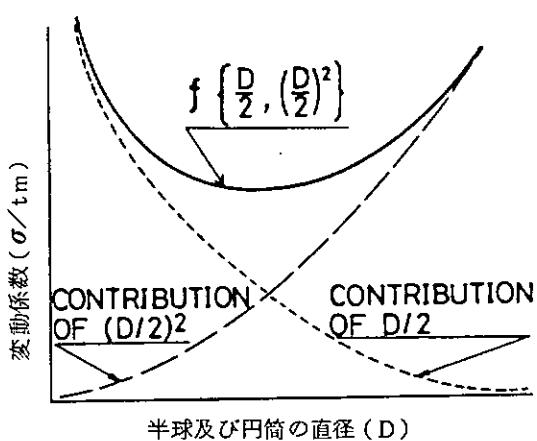


図 3.2.15 σ/tm と D の関係の概念図

3.3 塗膜の初期劣化過程の解析

3.3.1 塗膜の限界ひずみによる性能評価

(1) 曲げ試験と引張試験の関係

曲げ試験時の試験片の曲率を $K(\delta; \chi)$ とする。ここに、 δ (mm) はたわみ、 χ (mm) は中央載荷線からの距離である。K は中央載荷線上で最大であり、しきつ発生時 ($\delta = \delta_c$ とする) の塗膜表面での最大ひずみを限界ひずみ (ϵ_c) とすると、(3.3.1) 式が成立する。

$$\epsilon_c = K(\delta_c; 0) (T_s/2 + t_o) \quad (3.3.1)$$

ここに、 T_s は塗装鋼板の鋼材厚さ (JIS G 3492 では 1.6 mm), t_o は塗膜の厚さである。一方、 $\delta = 38 \text{ mm}$ で、中央載荷線から χ の範囲で鋼板と塗膜との界面のひずみが ϵ_c 以上になったとする。この領域 ($-\ell < \chi < \ell$) では、塗膜と鋼材との接合部で塗膜の破壊が生じ、塗膜ははく離しやすくなる。この条件は、(3.3.2) 式となる。

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= K(38; \ell) \cdot T_s/2 \\ 100S &= 100 \cdot (2\ell) \quad \rightarrow \quad \ell = S/2 \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ここに、 $100S$ ははく離面積 ($S \text{ cm}^2$) を mm 単位に直したもの、鋼板・塗膜界面のひずみが ϵ_c 以上の領域の幅 (2ℓ) に乘せられている 100 は試験片の幅である。(図 3.3.1)

曲率 $K(\delta; \chi)$ の上限は、中央載荷治具の直径 (D)、鋼板の厚さ (T_s) 及び治具と接する部分での塗膜の厚さ (t_p) によって、 $2/(D + T_s + 2t_p)$ で表わされる(図 3.3.1 参照)。鋼板を降伏ひずみ ($\epsilon_y = \sigma_y/E$) 0.2% の完全弾塑性体とし、塗膜の剛性は鋼材に比べ小さく無視できると仮定し、数値積分により(3.3.1)、(3.3.2)式の δ_c と S の関係を求めると、図 3.3.2 となる。図中に t と示されているのは、 $t = t_o = t_p$ と仮定した塗膜の厚さ、 ϵ_c は塗膜の限界ひずみを百分率 (%) で表わしたものである。本部会で試験された結果を図中にプロットしている。図を見ると、膜厚 0.5 mm 以下の実験結果は、 $t = t_o = t_p = 0$ の計算値の近傍にかたまっており、膜厚 1.5 mm 程度の塗膜の実験結果は、 $t = t_o = t_p = 1$ の計算結果から膜厚の大きな方に集まっている。 $t = t_o = t_p = 5$ の計算結果と膜厚 5 mm 程度の実験結果を比べると、 $\delta_c > 12 \text{ mm}$ では $\epsilon_c > 1\%$ であり、はく離面積 (S) は 6 cm² 以下と小さいことがわかる。以上から、曲げ試験結果の限界ひずみによる評価は妥当なものであると認められる。

(図 3.3.2)

単離塗膜の引張試験における伸び (e_c) は、曲げ試験における限界ひずみ (ϵ_c) そのものではない。今、試験時に体積変化がないと仮定せん断ひずみを無視すれば、曲げ試験における塗膜破壊時の主ひずみ ($\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$) は、

$$\epsilon_1 = \epsilon_c, \quad \epsilon_2 = 0, \quad \epsilon_3 = -\epsilon_c$$

であると考えられる。一方、引張試験では、

$$\epsilon_1 = e_c, \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = -e_c/2$$

と考えられる。ミーゼスの相当ひずみで塗膜の破壊が決定されるものとすれば、

$$e = (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/3 = 0$$

$$\sum_{\tau=1}^3 (\epsilon_\tau - e)^2 = \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 = \text{一定}$$

であり、 ϵ_c と e_c との間に(3.3.3)式が成立する。

$$e_c = (2/\sqrt{3}) \epsilon_c \quad (3.3.3)$$

引張試験は、標点間距離の影響、くびれによる不安定現象の影響などがあり、伸び (e_c) の方が、曲げ試験における限界ひずみ (ϵ_c) よりばらつきが大きいと予想される。

(2) 実海水暴露による限界ひずみの変化

1.2.2 項に示されている大阪湾における実海水暴露試験片の曲げ試験結果を(3.3.1)、(3.3.2)

式により整理し、暴露期間と限界ひずみ(ε_c)の関係を求める。図3.3.3及び図3.3.4となる。図3.3.3は仕様No.1, 2, 7及び8について示している。これらの塗装系は限界ひずみ(ε_c)が1%以下と小さく、はく離面積(S)から限界ひずみを求めている。なお図中の線は限界ひずみの経時変化の傾向を示したものである。図を見ると、半年から3年程度の限界ひずみが増大する期間(養生期間と考えられる)の後、限界ひずみは低下はじめている。図3.3.4はエポキシ系の2つの仕様(No.3及び4)について示している。ここでは、限界ひずみが大きいため、きれつ発生時のたわみ(δ_c)及びはく離面積(S)から求めた限界ひずみの内、小さい値を採用している。図を見ると、エポキシ(仕様No.3), タールエポキシ(仕様No.4)ともに、初期に限界ひずみが単調に減少する明確な低下期間が認められる。このような現象は、他の塗装系には見られず、エポキシ系塗膜の劣化初期段階では、限界ひずみから暴露期間またはそれに相当する期間を推定できる可能性を示している。しかし、1年以上の暴露期間の後は、限界ひずみの変化は単調ではない。そこで、大阪湾における1年程度またはそれに相当する時間を受けた場合には、限界ひずみによる評価は困難と思われる。(図3.3.3, 図3.3.4)

3.3.2 塗膜の電気抵抗による性能評価

(1) 直流抵抗(体積抵抗率)と交流抵抗の関係

直流抵抗には塗膜-金属界面の分極抵抗が含まれるが、交流抵抗には含まれない。そこで、劣化による直流抵抗の低下は、塗膜下の腐食反応の開始(分極抵抗の低下)を意味する。一方、分極抵抗を含まない塗膜そのものの抵抗と考えられる交流抵抗も劣化の進行により変化する。しかし、塗膜に孔が生じていると判断される場合を除けば、この変化は小さい。

(2) 実海水暴露による交流抵抗の変化

限界ひずみによる初期劣化の評価の可能性があるエポキシ系塗膜の海上暴露及び実海水暴露実験結果の交流抵抗変化を整理すると図3.3.5及び図3.3.6となる。図中、長崎は2.3節、玉野は4.7節に示されている。玉野におけるエポキシ塗膜(図3.3.5)を見ると、暴露後1年程度、交流抵抗は初期値よりも大きな値で安定している。1年をすぎると交流抵抗は低下をはじめ、暴露後2年半以後に再び安定する。タールエポキシ塗膜(図3.3.6)では、玉野における暴露実験結果の交流抵抗変化は小さいが、2年以後に抵抗の低下が見られる。一方、長崎における暴露では、暴露後1年から2年にかけて急激な交流抵抗の低下が見られ、その後安定している。

これらの結果を見ると、実海水に暴露されたエポキシ系塗膜は、1ないし2年の交流抵抗が安定な期間の後、交流抵抗が低下はじめ、2ないし2年半後から再び安定することがわかる。

(図3.3.5, 図3.3.6)

3.3.3 劣化促進試験の促進効果

(1) 食塩水中での促進試験

本部会では昭和56年度に食塩水浸漬による劣化促進試験を行っている。試験条件は、NaCl濃度3段階(0.3, 3, 10重量%), 温度3段階(室温, 40°C, 60°C), 吹き込みガス2種(空気, 酸素), 浸漬期間3段階(1週間, 1箇月, 3箇月)である。測定項目は、力学的性質2種(付着力, 単離塗膜の引張)と電気化学的性質3種(体積抵抗率, インピーダンス, ガス透過率)である。この試験のパラメータを①NaCl濃度(Z; 重量濃度), ②温度(T; K), ③浸漬期間(t; 年)とする。溶解ガス濃度(特に酸素量)が明確でないため、吹き込むガスの種類はここでは取り扱わない。

塗膜の劣化速度をkとする。3.3.1項の大坂湾における海水暴露の劣化速度をk*, 暴露時間をt*とする。この促進試験の劣化速度をk(T, Z)とし、促進試験における劣化促進効果($\eta(T, Z)$)及び基準暴露時間(\tilde{t})を以下のように定める。

$$k^* = k(T, Z)t$$

$$\tilde{t} \equiv t^* = \eta(T, Z)t$$

(3.3.4)

$$\eta(T, Z) = k(T, Z)/k^* \quad (3.3.5)$$

ここでは、 k^* を一定と仮定する。 $k(T, Z)$ は劣化を化学反応の結果と考え、反応速度の式 (3.3.6) 式で表わす。すると劣化促進効果は (3.3.7) 式となる。

$$k(T, Z) = \tilde{A} T \exp(-B/T) \exp(C \varepsilon_n Z) \quad (3.3.6)$$

$$\eta(T, Z) = A T \exp(-B/T) \exp(C \varepsilon_n Z) \quad (3.3.7)$$

ここに、 $A = \tilde{A}/k^*$ 、 B 、 C は定数であり、 A は K^{-1} 、 B は K の次元を持つ。(3.3.6) 及び (3.3.7) 式の A 、 \tilde{A} の後に乘じられている温度 (T) を略しても、 A 、 B の変更により、この温度範囲では (3.3.7) 式とほぼ同じ温度と NaCl 濃度の存在性を表現できる。

(a) 限界ひずみによる劣化促進効果の推定

温度 T_K 、空気または酸素を吹き込んだ NaCl 濃度 Z の溶液中に t 年間さらした単離塗膜の引張試験で伸び e_c を得たとする。(3.3.3)式により、伸び (e_c)を限界ひずみ (ε_c)に換算すると、図3.4から大阪湾実海水暴露と等価な時間 ($\tilde{t} \equiv t^*$)が推定できる。

$$\begin{array}{l} \tilde{t} \sim \eta(T, Z) t \\ \uparrow \\ \left\{ \begin{array}{l} e_c \rightarrow \varepsilon_c = (\sqrt{3}/2) e_c \\ \varepsilon_c \rightarrow t^* \equiv \tilde{t} \end{array} \right. \end{array} \quad (3.3.8)$$

(3.3.7) 及び (3.3.8) 式を用いて、最小2乗法により A 、 B 、 C を決定できる。以上的方法で、エポキシ系塗膜の劣化促進効果 $\eta(T, Z)$ を決定した。計算にあたってエポキシとタールエポキシの劣化促進効果は等しいと仮定した。図3.3.4に見られるように、エポキシ系塗膜は、同一の限界ひずみに対し複数の暴露時間が対応している。そこで、解析範囲を $0 < \tilde{t} < 1$ に限定し、最小2乗法で得られた $\eta(T, Z)$ から \tilde{t} が 1 以上となるデータを除いて再び最小2乗法を適用するイタレーションを行った。その結果 (3.3.9) 式が得られた。

$$\eta(T, Z) = 14.82 T \exp(-1884/T) \exp(0.09341 \varepsilon_n Z) \quad (3.3.9)$$

図3.3.7及び図3.3.8は (3.3.4) 及び (3.3.9) 式により \tilde{t} を求め伸びとの関係を示したものである。伸びの値は大きくばらついているが、大阪湾における限界ひずみを伸びに換算したものと比べると、図3.3.7のエポキシの空気吹き込みの場合を除いて、(3.3.9) 式はほぼ満足できる促進効果の評価式と思われる。(図3.3.7、図3.3.8)

(b) 交流抵抗変化の比較

図3.3.5及び図3.3.6に示された玉野の洋上暴露時間及び長崎の実海水暴露時間と図3.3.7及び図3.3.8の基準暴露時間(大阪湾と同等)とが等しいと仮定して、食塩水中での促進試験における交流抵抗変化を整理すると、図3.3.9及び図3.3.10となる。(図3.3.9、図3.3.10)

図を見ると、促進試験結果を (3.3.9) 式で整理したものは、玉野及び長崎の結果に比べて、①全般的に値が小さい ②低下開始時期が早い の2つの相違があるものの、似た傾向を示している。①については、交流抵抗の初期値のばらつき、または、洋上暴露あるいは実海水中で生じる交流抵抗の初期の上昇がこの促進試験ではうまく評価できていないなどの理由が考えられる。②については、ここで基準暴露時間としている大阪湾に比べ玉野あるいは長崎の劣化速度が遅いためではないかと思われる。エポキシ及びタールエポキシの交流抵抗の測定結果がそろっている玉野について、その劣化速度がここで基準としている大阪湾の 0.54 倍として暴露時間を換算し、初期値について定数を乗じると、図3.3.9と図3.3.10の中の1点鎖線となる。促進試験結果はばらついているものの、1点鎖線で示された結果と比較的よく一致している。

(c) 体積抵抗率に関する検討

本項では、促進効果を力学的な性質であるひずみを比較することで評価し、さらに、その促進効果の評価式が条件つきで交流抵抗に対しても有効であることを示してきた。ここでは、実海水暴露実験では計測されていない体積抵抗率について、促進試験結果を整理検討する。

図 3.3.1 4 及び図 3.3.1 2 はそれぞれエポキシ及びタールエポキシについて、 $\tilde{t} = \eta(T, Z)t$ と体積抵抗率との関係を示したものである。図中、上辺に矢印を付けたプロットは抵抗が大きすぎて測定不能であったことを示している。図を見ると、 \tilde{t} が 1 年以上の領域で急激な体積抵抗率の低下が見られる。図 3.3.1 3 は、タールエポキシとエポキシとでは体積抵抗率が 2.8 倍異なると仮定して、空気吹き込み試験について整理したものである。図には(I)～(IV)の 3 つの領域が示されている。 $\tilde{t} < 1$ では、ほとんど全ての値が(I)(II)領域にあり、(I)領域ではほとんど全ての値がここには示していないが測定不能な大きな抵抗となっている。 $\tilde{t} > 1.3$ では、全ての値が(II)(IV)領域にある。 $1 < \tilde{t} < 1.3$ では、(I)領域で体積抵抗率が測定不能なほど大きなもの、及び、(IV)領域で体積抵抗率が激減したものが共に存在する。(図 3.3.1 1, 図 3.3.1 2, 図 3.3.1 3)

(2) 热冷衝撃試験

本部会では 3.2 節に示されているように、水を媒質とする熱冷衝撃試験を行っている。ここでは、エポキシ塗膜の熱冷衝撃試験による劣化促進効果を交流抵抗変化により検討する。

熱冷衝撃試験のパラメータは ① 使用媒体 ② 上下設定温度 ③ 上下設定温度保持時間 ④ 衝撃回数である。ここでは、媒体として水道水を用い、下設定温度 0 ℃、上設定温度 60 及び 100 ℃、保持時間 30 秒の試験を取り扱う。

熱冷衝撃試験の温度による効果の差異を見積るには、上下設定温度及び温度差を考慮する必要がある。しかし、温度差の影響を明らかにするに十分なデータは得られていない。そこで、上設定温度を重視して、(3.3.1 0) 式を劣化促進効果式として採用した。

$$\tilde{\eta} = \lambda(T_e, t_e, T_h) f(T_h) \quad (3.3.1 0)$$

$$\text{ただし } f(T_h) = T_h \exp(-1884/T_h)$$

ここに、 T_e は下設定温度(K)、 T_h は上設定温度(K)、 t_e, t_h は下設定温度及び上設定温度における保持時間(秒)、 $\tilde{\eta}$ は熱冷衝撃 1 サイクル当たりの劣化促進効果(年)である。関数 f で示される上設定温度の効果は(3.3.9) 式を参考にして定められている。(3.3.1 0) 式で、上設定温度が 60 ℃ と 100 ℃ の場合を比べると、100 ℃ は 60 ℃ に比べ 2.05 倍の促進効果となる。

図 3.3.1 4 に、熱冷衝撃試験による交流抵抗の変化を示した。横軸には、大阪湾における実海水暴露及び玉野における洋上暴露期間並びに上設定温度 60 ℃ 及び 100 ℃(下設定温度は共に 0 ℃) の熱冷衝撃回数が劣化速度あるいは劣化効果を考慮して示されている。図中の実線は、玉野における交流抵抗変化である。点線は、食塩水中での劣化促進試験結果に玉野の値をフィットさせたものであるが、これを大阪湾における交流抵抗変化の推定値とした。大阪湾における実海水暴露期間を基準時間として、熱冷衝撃による劣化促進効果は、 $\lambda(273, 30, 30) = 2.316 \times 10^{-2}$ (年) としている。(図 3.3.1 4)

3.3.4 エポキシ系防食塗膜の初期劣化

前項まで、実海水暴露試験及び劣化促進試験の結果から、大阪湾における実海水暴露期間を基準時間として、限界ひずみ、直流抵抗(体積抵抗率)、交流抵抗の変化を調べた。これらの結果を概念的に示すと図 3.3.1 5 となる。(図 3.3.1 5)

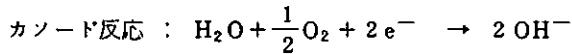
エポキシ系塗膜は、ある時期(図中 t_2)まで限界ひずみまたは伸びが低下する。この期間、体積抵抗率はほとんど無限大と評価されるほど大きな状態から急激な低下の後、図中(II)の領域に至り、(II)の領域でゆっくりと低下してゆく。交流抵抗は、初期値からその 1 ~ 2 倍程度に増大し安定する。その後、交流抵抗は減少するがその変化は体積抵抗率に比べ小さい。

ある時期(図中 t_3)をすぎると、交流抵抗の減少は止まり安定する。一方、限界ひずみまたは伸びは、増大あるいは減少し、限界ひずみクライテリオンによる評価は困難となる。体積抵抗率は(II)の領域でのゆるやかな減少から、電導経路の発生により(IV)の領域に入るものが出てくる。

海水中での塗膜の劣化は以下の機構で進行する。*)

*) H. Leidheiser & M.W. Kendig : Corrosion, Vol. 32, No. 2 (1976), p. 69-76.

- ① 水、酸素、イオンが塗膜を透過する。
- ② 素地金属と外部溶液との間の電導経路として、塗膜の一部に電気抵抗の小さな通路が発生する。
- ③ アノード反応 : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$



がおこり、カソード領域では塗膜のふくれが生じる。

- ④ 腐食反応の進行とともに、塗膜の電導経路の下の金属表面でイオン濃度が増大し、固形の腐食生成物が生じる。
- ⑤ 鉄の溶出は pH を低下させ、アノードの pH は低下する。一方、カソードの pH は上昇する。このいずれもが塗膜を劣化させる。

アノード領域は酸性であり塗膜はもろくなり、ふくれが小さい内にやぶれやすい。一方、カソード領域はアルカリ性で、塗膜は軟化し付着が悪くなるため、ふくれは大きく成長しやすい。

ここで取り扱ったのは、以上の劣化機構のごく初期の段階①から②にかけてである。すなわち、図 3.3. 1 5 の(I)の領域は劣化機構の①のさらに初期の段階と考えられる。この段階では、塗膜-素地界面の分極抵抗は非常に大きい。(II)の領域は劣化機構の①が進行している状態であり、塗膜-素地界面は分極しているものの電導経路は生じていない。(III)の領域は、塗膜に電導経路が生じた劣化機構の②以後の段階であると考えられる。そこで、図中の t_2 あるいは t_3 が劣化機構の①と②を分けると考えられる。 t_2 及び t_3 はここで基準時間としている大阪湾の実海水暴露で示せば、それぞれ 1 年及び 1.35 年程度である。しかし、大阪湾における計測は 0.5 年毎に行われており、1 年と 1.35 年とは誤差の範囲内であると考えられる。そこで、 t_2 、 t_3 を含む 1 ~ 1.35 年（大阪湾における実海水暴露期間、玉野の海上暴露においては 1.85 ~ 2.5 年）程度の実海水暴露によって、エポキシ系防食塗膜の初期劣化の段階は終了し、電気抵抗の低い電導経路が生じる可能性があるとの結論が得られる。その後、劣化機構の③～⑤と進行して防食塗膜はその機能を失ってゆくわけだが、ここでは、そこまでは取り扱わなかった。

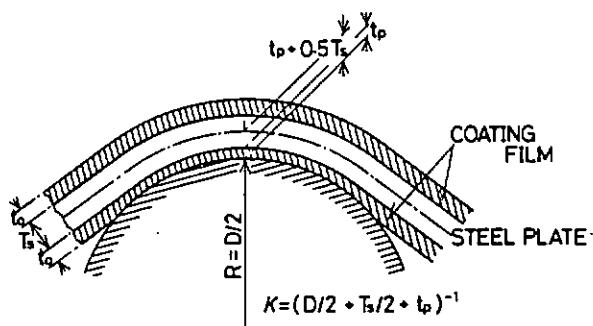


図 3.3.1 曲げ試験の最大曲率

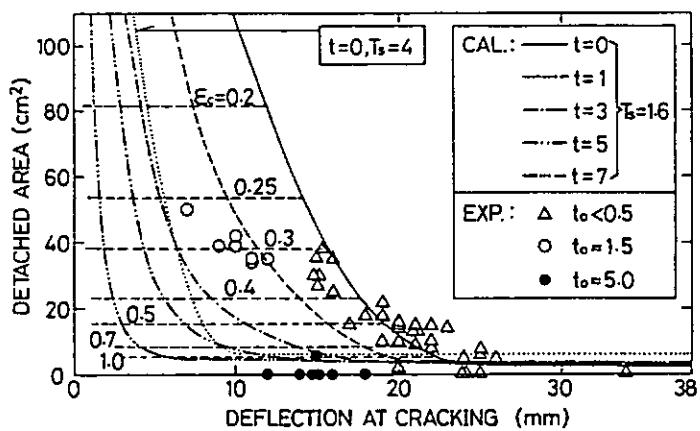


図 3.3.2 きれつ発生時のたわみとく離面積の関係

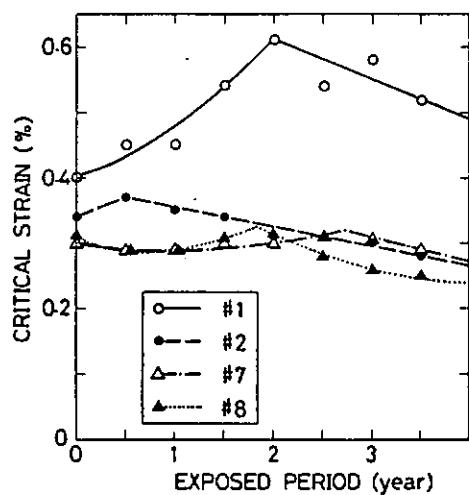


図 3.3.3 限界ひずみの経時変化(防食仕様No.1,2,7,8)

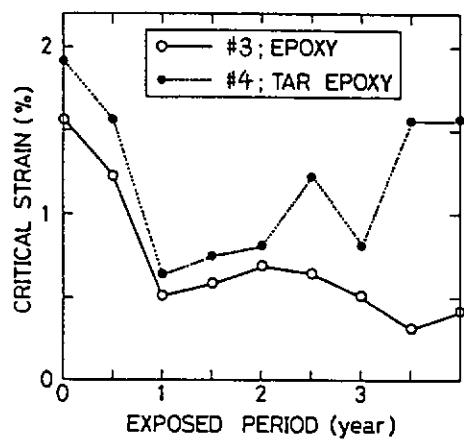


図 3.3.4 限界ひずみの経時変化（防食仕様No.3, 4）

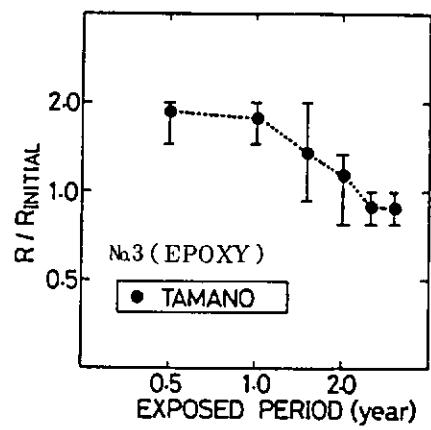


図 3.3.5 交流抵抗変化（防食仕様No.3）

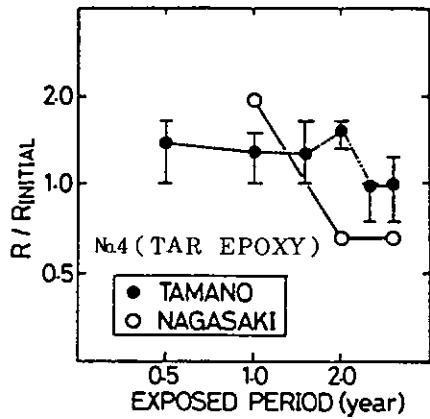


図 3.3.6 交流抵抗変化（防食仕様No.4）

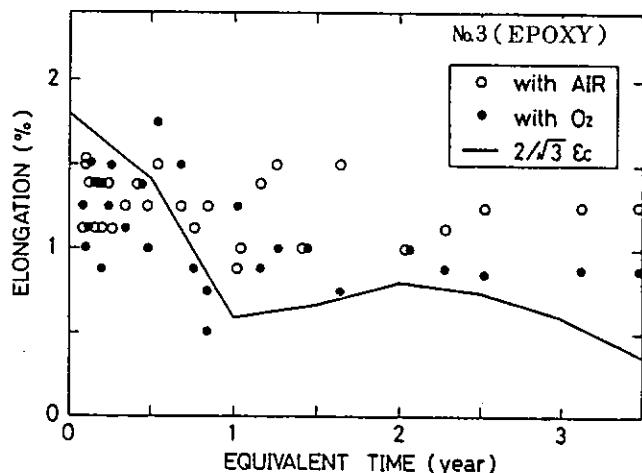


図 3.3.7 等価暴露期間と伸びの関係（防食仕様No.3）

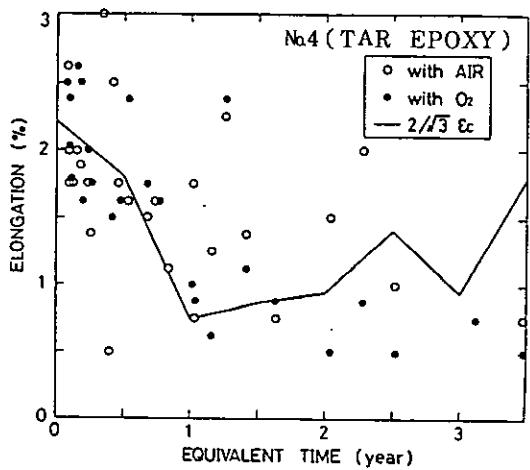


図 3.3.8 等価暴露期間と伸びの関係（防食仕様No.4）

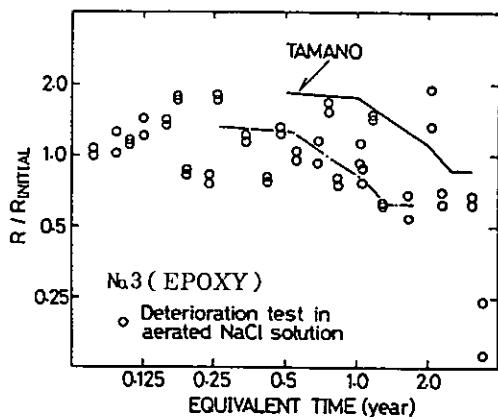


図 3.3.9 等価暴露期間と交流抵抗変化の関係（防食仕様No.3）

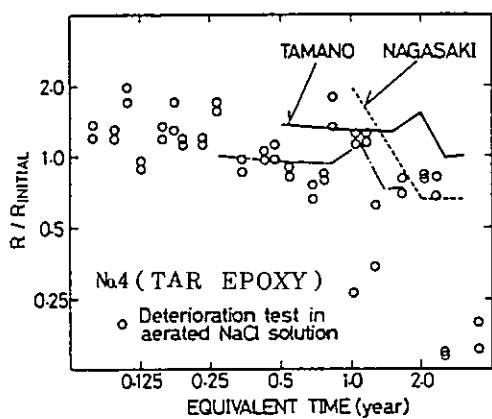


図 3.3.10 等価暴露期間と交流抵抗変化の関係
(防食仕様No.4)

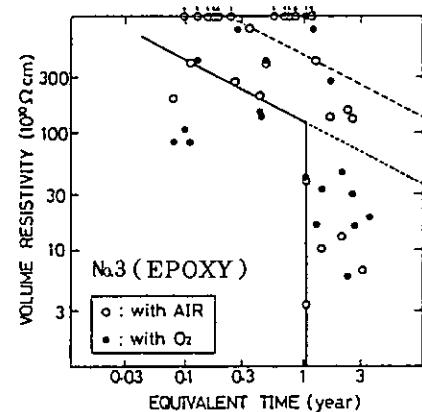


図 3.3.11 等価暴露期間と体積抵抗率
(防食仕様No.3)

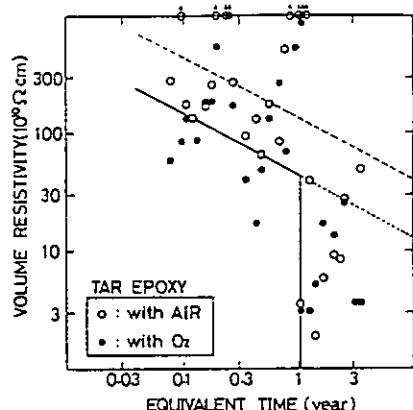


図 3.3.12 等価暴露期間と体積抵抗率
(防食仕様No.4)

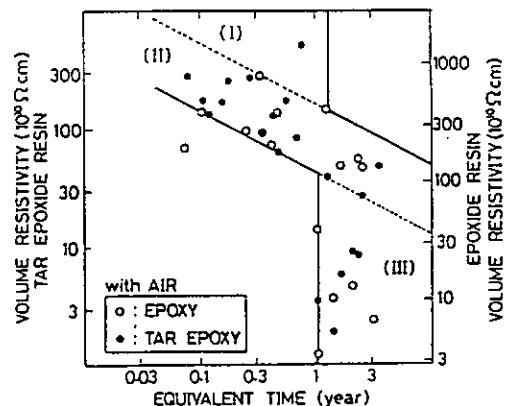


図 3.3.13 等価暴露期間と体積抵抗率
(防食仕様No.4)

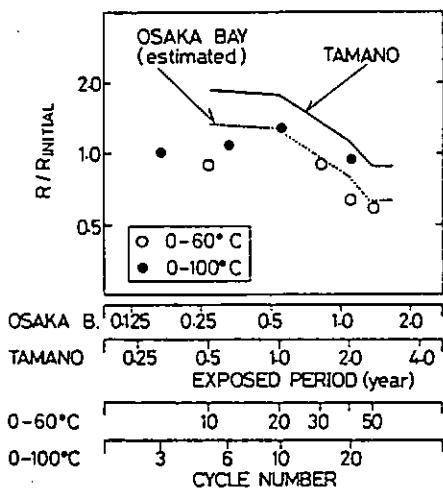


図 3.3.14 热冷衝撃試験による交流抵抗変化
(防食仕様No.3)

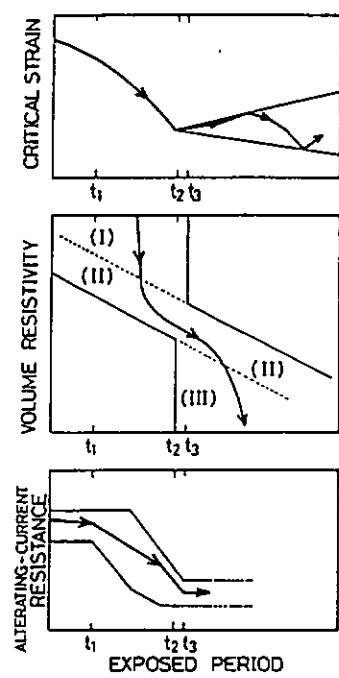


図 3.3.15 エポキシ塗膜初期劣化の概念図

3.4 防食材料の寿命推定に関するまとめ

- (1) 促進劣化試験法として、種々の方法を試みたが、促進耐候試験 60 時間と 3% 塩水浸漬 20 日間を組合せたものを 1 サイクルとする方法または、後述する熱冷衝撃浸漬法がかなり有効であることが認められた。劣化判定法としては、(1)付着力、(2)単離膜の機械的性質、酸素透過性、(3)交流インピーダンス、(4)イオン電極法により C 及びイオン透過速度、(5)カレントインターブタ法による塗膜の電気抵抗、塗膜下腐食速度などについて検討したが、これらのうちではカレントインターブタ法が塗膜劣化判定法として優れているということが判明した。本法により求めた塗膜下腐食速度または塗膜電気抵抗と実際の塗膜下腐食状況との間には明らかに相関性が認められた。また、本法で求めた値をもとに塗膜寿命推定が可能であることが判明した。ただ、これらの測定値は、促進時間と共に必ずしもリニアな変化を示さないこと、ばらつきがあること、厚膜型塗料に対しては促進試験といえどもかなり長時間を要することなどが問題として残された。
- (2) 热冷衝撃浸漬法は熱湯と冷水とに交互に塗装板を浸漬することを繰返すものであって、塗膜の厚さ方向に急激な温度勾配が交互に生じ、熱膨張と熱収縮の作用により、塗膜内部の潜在的欠陥を増大させると共に鋼板との付着面にはく離を生じさせる。さらに有機材料のガラス転移点を超える温度により分子構造的な欠陥発生を促進させると推定される。これらの作用は防食材内部へのイオン、水分等の浸透を助長し、塗膜下腐食の発生を促すと考えられる。また、劣化促進と海水暴露等による材料の各種特性値を比較検討した結果、初期劣化は先づ塗膜の限界ひずみの低下に始まり、次いで電気抵抗値が急速に低下する時期が認められる。この時期においては限界ひずみの変化は不定形となるが、この終末期以降には塗膜の脆化現象が始まると推定されるため、劣化の後期では繰返し応力の疲労試験が劣化促進に有効となると考えられる。また以上の観点により、劣化過程に応じて劣化判定の主眼点がひずみ→電気特性→疲労と変化することが示唆された。さらに塗膜の初期欠陥（潜在的な欠陥も含む）が劣化の進展に大きく関与することが認められ、これは初期の膜厚分布等により推定できるとの見通しを得たため、塗装の施工管理も劣化判定項目の一つとなることを導き出した。

4. メインテナンス方法の調査・検討

4.1 調査検討の目的

海洋構造物は一応メインテナンスフリーとして耐用期間数十年を目標に設計されているが、構造物の部位設置場所によっては、防食塗装上種々の劣化因子の影響があり、腐食環境として苛酷な条件下にある。しかも海洋構造物では入渠困難なものが多く、これらに用いられる重防食塗装系の洋上におけるメインテナンス方法の指針を得るために試験体や試験板の海上設置を行い部位別に調査・検討を行った。

4.2 調査内容

海洋構造物用重防食塗装系のメインテナンス方法に関する調査・検討をS 5 5年度～S 5 9年度にかけて実施した。本実験に用いた重防食塗装系は表4.2.1に示す8仕様であり、これらを用いての実験の概要は次に示すとおりである。

表4.2.1 供試塗装系

防食 仕様 No.	S/P	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	目標 膜厚 (μm)
1	IZP	IZ	※ PE・A/C	PE・A/C	PE・T/S	U・T/S	350
2		IZ	※ TE	—	—	—	325
3		PE・A/C	PE・A/C	PE・A/C	PE・T/S	PE・T/S	380
4		TE	TE	—	—	—	400
5		IZ	※ PE・A/C	V・(中塗)	V・T/S	—	275
6	なし	PEM	—	—	—	—	5,000
7		PEF	同左	—	—	—	1,300
8		ESF	同左	—	—	—	1,500

注) ※ ミストコートあり

(1) 浮体構造物試験体

試験体はSGA-500Aパイプ(3.65m)4本から構成されており、個々の試験体には表4.2.2に示す重防食塗装を施工し、S 5 5年9月に実海域へ設置した。本構造物没水部はS 5 6年10月とS 5 8年10月に生物除去のため水中清掃を実施した。更にS 5 8年4月一部の塗膜を強制はく離させ6箇月間実海域に設置しS 5 8年10月水中補修塗装を行った。本年度はS 5 9年9月にその没水部において、水中機器を用いて水中検査、水中清掃、水中塗装等を実施した。なお、構造物の詳細は研究資料No.341を参照されたい。

表 4.2.2 試験体用塗装系

防食仕様	S/P	1回目 (μm)	2回目 (μm)	目標膜厚 (μm)
マ6	サンドブラスト SPSS JASd 2~3	ポリウレタン ホールディング ブライマー	PEM (5,000)	5,000
マ7		—	PEF (650)	1,300
マ8		—	ESF (750)	1,500
ES		ポリエステル ホールディング ブライマー	ポリエステル FRPライニング (1,250)	ポリエステル 上塗 (300)

(2) 上部構造物及び洋上暴露試験板

上部構造物は SGA-200A バイブ (1.5 m) 上下端部の 2箇所と中央部に補強構造を有する形式で 8 体製作した。これらに表 4.2.1 で示した防食仕様マ1~8 を適用し、浮体構造物に増設した。

洋上暴露試験板は防食仕様マ1~8 について無塗装ゾーンのある試験板とない試験板を製作し、経年後の補修や各種試験に供した。

これら上部構造物及び洋上暴露試験板は S 56 年 6 月に設置し経年後の補修実験等に供した。

上部構造物等の詳細は研究資料マ 347 を参照していただきたい。

(3) 水中メインテナンス試験板

防食仕様マ1~8 を適用した無塗装ゾーン設定試験板を S 55 年 10 月に実海域へ浸漬し、1箇年経過後の S 56 年 10 月に水中補修塗装を実施し、その経年変化を調べた。水中補修塗装に用いた 3 種の水中硬化型塗料の性状は表 4.2.3 に示す。

表 4.2.3 水中硬化型塗料の性状(気中データ)

性状 塗料種	外観	混合比 (重量)	初期硬化時間(20°C)	可使時間 (20°C)	比重 (混合後)
A (エポキシ系)	主剤:白色バテ状 硬化剤:黒色バテ状 (高粘度)	主:硬 1:1	2 h	45 min	1.6
B (エポキシ系)	主剤:黄色バテ状 硬化剤:黒色バテ状 (高粘度)	1:1	6 h	10 h	1.4
C (ポリエステル エポキシ系)	主剤:白 硬化剤:半透明 (流動性・有り)	10:1	8 h 以内	40 min	1.7

(4) 洋上暴露した無塗装ゾーン設定試験板の補修

防食仕様マ1~8 を適用し、S 56 年 6 月に洋上暴露した無塗装ゾーン設定試験板は 1 箇年経過後の S 57 年 6 月に無塗装ゾーン近傍をパワーツール処理及びブラスト処理を行ったのち、補修塗装し、経年変化を調査した。

防食仕様マ1~8 の補修に用いた塗装仕様は表 4.2.4 に示す。

表 4.2.4 補修塗装仕様の詳細

防食仕様 補修仕様	1回目 (μm)	2回目 (μm)	3回目 (μm)	4回目 (μm)	目標 膜厚(μm)	塗装方法
Ma 1	PE・A/C (150)	PE・A/C (150)	PU・T/S (35)		335	刷毛
Ma 2	TE (125)	TE (125)			250	"
Ma 3	PEM (350)	PE (140)			390	"
Ma 4	TE (125)	TE (125)			250	"
Ma 5	NT・A/C (100)	PE・A/C (100)	V. (中塗) (60)	V. T/S (40)	300	"
Ma 6	PEM (5,000)				5,000	"
Ma 7	PEF (650)	PEF (650)			1,300	"
Ma 8	ESF (750)	ESF (750)			1,500	"

(5) 水中硬化型塗料によるメインテナンスの検討

無塗装試験板を飛沫部、干満部及び没水部に6箇月放置したものや、防食仕様Ma 1～8 塗装試験板を1箇年、実海水中に放置したものについて、表 4.2.3 に示した3種の水中硬化型塗料により下地処理～養生方法も含めた補修を S 5 7 年 9 月に実施し、経年変化を調査した。

(6) 水中補修材料の長期防食性

海浜干満帯へ S 5 8 年 5 月に設置した無塗装(プラスチック処理)鋼管杭 (SGP-300A×3.5 m・6本)を対象に干潮時を利用した補修を S 5 8 年 9 月に実施し経年変化を調査した。補修に用いた材料を表 4.2.5 に示す。なお、钢管杭の詳細については研究資料 No. 369 を参照して戴きたい。

表 4.2.5 補修材料の詳細

性状 材料種	外観	混合比 (重量)	初期硬化時間 (20°C)	可使時間 (20°C)	比重 (混合比)
水中硬化型塗料 D (ポリエスチル系)	主剤：銀色 硬化剤：透明	主：硬 100:1	24 h 以内	15 min	1.3
水中硬化型塗料 E (ポリエスチル系)	主剤：灰色 硬化剤：透明	100:1	"	"	1.3
水中硬化型塗料 F (エボキシ系)	主剤：青色 硬化剤：白色	1:1	9 h	30	1.7
汎用タールエポキシ 塗料 (タールエポキシ)	主剤：黒色 硬化剤：透明	9:1	24 h 以内	5 h	1.2
防食テープ FRP カバー	1st : グリス状ペースト 400 g/m ² 塗布 2nd : ベトロラタムテープ 55%ラップで巻付 3rd : FRP (5 mm厚)カバー取付 4th : 真鍮ボルトにて締付				

注 他の供試塗料 A, B, C は表 4.2.3 に記載したものと同じである。

(7) 水中メインテナンス実験

浮体構造物没水部を用いて、水中検査並びに水中補修に関する実験を S 5 9 年 9 月に実施し、その模様をビデオ収録した。

(8) 気象条件

実験開始から現在までの気象条件を表 4.2.6 及び図 4.2.1 に示す。

表 4.2.6(1) 気象データ (S 5 5 / 9 ~ S 5 6 / 8)

項目 \ 年月	S 5 5 / 9	10	11	12	S 5 6 / 1	2	3	4	5	6	7	8
平均気温 ℃	22.6	17.6	12.4	6.2	3.3	4.3	8.2	13.0	16.7	21.4	26.5	26.6
平均湿度 %	82	76	76	68	64	69	69	68	69	78	74	72
平均風速 m/s	2.2	2.2	1.7	2.4	2.6	2.0	2.0	2.0	1.7	1.4	2.1	2.7
総雨量 mm	109	131	49	23	7	47	107	104	118	246	79	41

表 4.2.6(2) 気象データ (S 5 6 / 9 ~ S 5 7 / 8)

項目 \ 年月	S 5 6 / 9	10	11	12	S 5 7 / 1	2	3	4	5	6	7	8
平均気温 ℃	22.7	17.5	10.9	7.2	5.4	5.1	8.8	12.8	18.5	21.7	24.0	26.8
平均湿度 %	73	73	74	71	67	67	66	66	69	71	79	82
平均風速 m/s	2.1	2.4	2.4	2.2	2.4	2.4	2.7	3.0	2.3	2.7	2.7	3.2
総雨量 mm	72	80	62	16	20	44	72	108	59	63	205	62

表 4.2.6(3) 気象データ (S 5 7 / 9 ~ S 5 8 / 8)

項目 \ 年月	S 5 7 / 9	10	11	12	S 5 8 / 1	2	3	4	5	6	7	8
平均気温 ℃	22.5	14.2	11.0	8.2	5.9	5.1	8.3	14.8	18.5	21.9	26.0	28.9
平均湿度 %	75	71	73	68	67	59	67	66	63	65	74	68
平均風速 m/s	2.6	2.3	2.3	1.9	2.0	2.2	2.3	2.7	2.2	2.3	1.8	2.3
総雨量 mm	124	30	81	18	22	18	108	107	97	107	131	9

表 4.2.6(4) 気象データ (S 5 8 / 9 ~ S 5 9 / 8)

項目 \ 年月	S 5 8 / 9	10	11	12	S 6 0 / 1	2	3	4	5	6	7	8
平均気温 ℃	25.0	17.9	12.1	6.8	3.6	2.8	5.7	12.2	17.4	22.2	26.3	28.8
平均湿度 %	76	70	68	65	66	65	62	62	62	72	74	71
平均風速 m/s	2.2	2.1	2.1	2.3	2.2	2.1	1.9	2.2	1.8	2.0	1.9	2.6
総雨量 mm	358	61	26	25	20	45	57	81	83	153	61	68

表 4.2.6(5) 気象データ (S 5 9 / 9 ~)

項目 \ 年月	S 5 9 / 9	10	11	12	S 6 0 / 1	2	3	4	5	6	7	8
平均気温 ℃	24.0	17.8	13.3	7.4								
平均湿度 %	71	68	69	66								
平均風速 m/s	2.1	2.0	1.8	2.4								
総雨量 mm	87	58	23	23								

注 岡山地方気象台・月報による

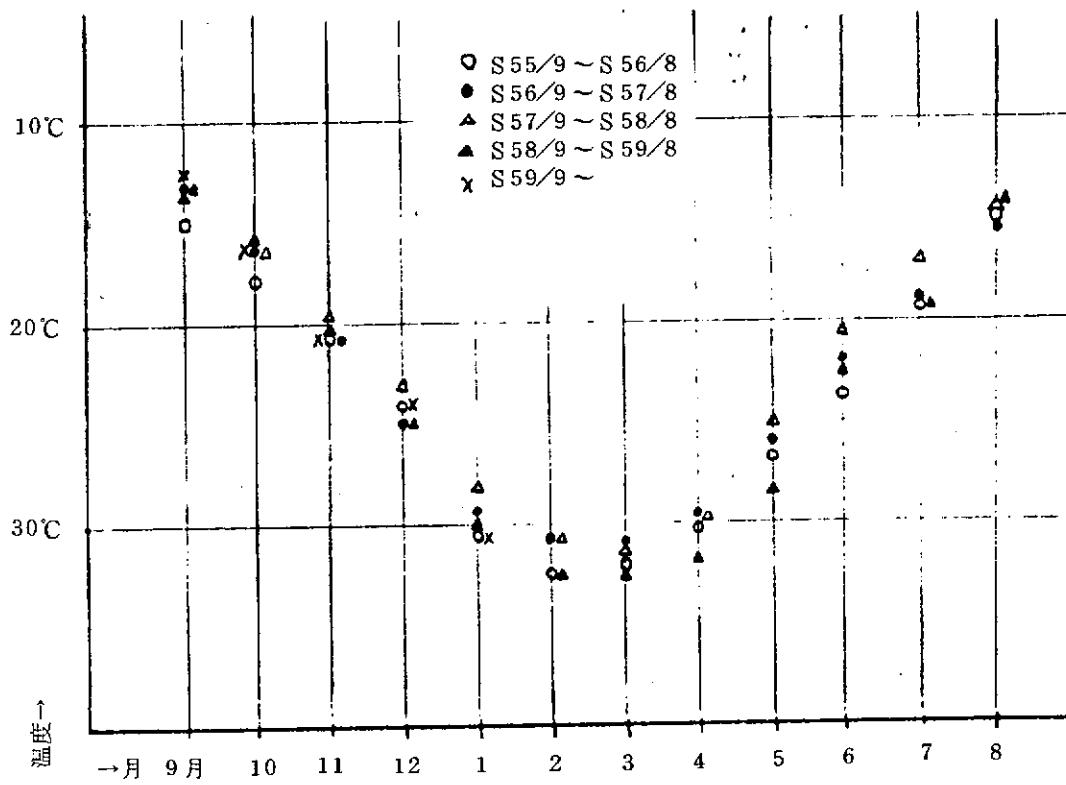


図 4.2.1 海水温度

4.3 浮体構造物の調査

(1) 外観(水線以上)

浮体構造物の4箇年経過後の外観調査結果を表4.3.1に示す。

表 4.3.1 浮体構造物の外観(4箇年後)

防食 仕様 対象	さび	ふくれ	われ	退色
M6 (PEM)	○	○	○	表面自化 チョーキング
M7 (PEF)	○	○	○	表面やや黄変 チョーキング
M8 (ESF)	○	○	○	チョーキング
ES (FRP)	○	○	○	"

㊟ 評価 ○:異常なし

(2) 生物付着状況

浮体構造物に適用した防食仕様毎の生物付着状況を表 4.3.2(1)~(4), 経時の付着量を表 4.3.3 に示す。

更に本年度における生物付着状況及び付着量調査後の塗膜状態を図 4.3.1 ~ 2 に示す。

表 4.3.2(1) 生物付着状況 (S 55 年 9 月 ~ S 56 年 10 月)

付着 防食 仕様	緑 藻	褐 藻	ふ じ	ちごけ	単 ぼ や	複 合 ぼ や	なぎ さ こけむし	ミ ル	そ の 他	付着重量 kg/m ² (wet) (南面)
M6 (PEM)	卅	+	卅	+	+	+	卅	卅	+	3.1
M7 (PEF)	卅	+	廿	+	+	廿	廿	+	+	2.5
M8 (ESF)	卅	+	廿	廿	+	+	廿	廿	+	2.6
ES (FRP)	卅	+	廿	+	+	廿	廿	+	+	2.8

注 (1) 付着量評価; 卅: 大, 廿: 中, +: 小

(2) 付着重量 kg/m² (wet); 水深 1 m 付近の 15 cm × 15 cm の採集量から換算

表 4.3.2(2) 生物付着状況 (S 56 年 10 月 ~ S 57 年 12 月)

付着 防食 仕様	緑 藻	褐 藻	ふ じ	ちごけ	複 合 ぼ や	なぎ さ こけむし	そ の 他	付着量 kg/m ² (wet)	
								南 面	北 面
M6 (PEM)	+	廿	卅	廿	廿	+	+	3.6	4.0
M7 (PEF)	+	廿	卅	廿	廿	+	+	3.8	4.4
M8 (ESF)	+	廿	卅	廿~卅	廿	+	+	3.1	3.6
ES (FRP)	+	廿	卅	廿~卅	廿~卅	+	+	4.4	5.3



No.6 (PEM)



No.7 (PEF)

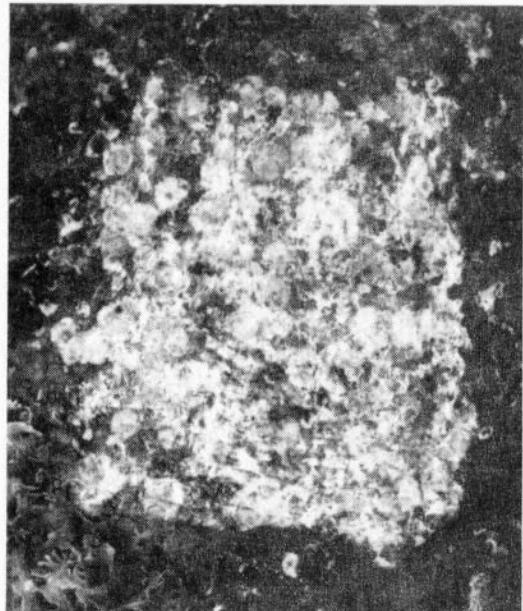


No.8 (ESF)



ES (TRP)

図 4.3.1 生物付着状態



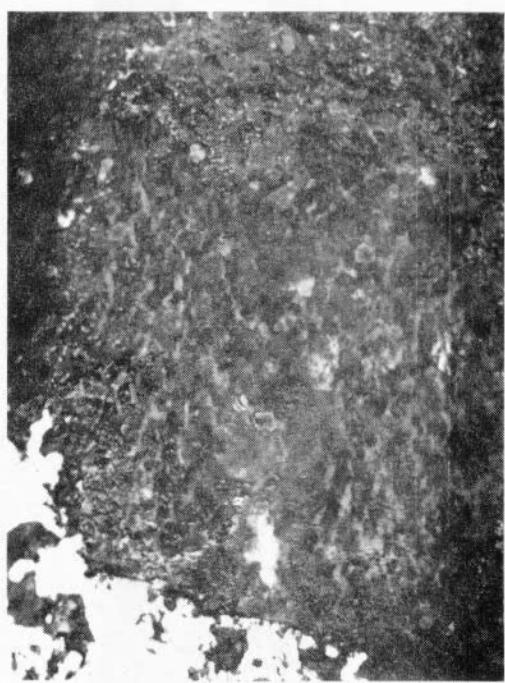
No.6 (PEM)



No.7 (PEF)



No.8 (ESF)



ES(FRP)

図 4.3.2 生物付着量調査後の塗膜状態

表 4.3.2(3) 生物付着状況 (S56年10月～S58年10月)

付着 防食 生物 仕様	スラ イム	褐 藻	ふじ つぼ	ちごけ むし	単 ぼや	複合 ぼや	セル プラ	付着量kg/m ² (wet)	
								南	北
M6 (PEM)	卅	僅少	卅	+	+	卅	卅	2.4	3.3
M7 (PEF)	卅	"	卅	+～卅	+	僅少	僅少	3.6	3.3
M8 (ESF)	卅	"	卅	僅少	+	+	+	2.7	1.8
ES (FRP)	卅	"	卅	+	+	+	+	2.4	3.6

表 4.3.2(4) 生物付着状況 (S58年10月～S59年9月)

付着 防食 生物 仕様	スラ イム	緑 藻	褐 藻	ふじ つぼ	ちごけ むし	複合 ぼや	セル プラ	付着量kg/m ² (wet)		
								その他	南	北
M6 (PEM)	卅	僅少	+	卅	卅	卅	+	+	2.3	2.0
M7 (PEF)	卅	"	+	卅	卅	卅	+	+	3.1	3.3
M8 (ESF)	卅	"	+	卅	卅	+	+	+	2.9	2.4
ES (FRP)	卅	"	+	卅	卅	+	+	+	1.9	2.9

表 4.3.3 経時の付着量kg/m²(wet)

期間 防食 位 置 仕様	S.55.9～S.56.10		S.56.10～S.57.12		S.56.10～S.58.10		S.58.10～S.59.9	
	南	北	南	北	南	北	南	北
M6 (PEM)	3.1	—	3.6	4.0	2.4	3.3	2.3	2.0
M7 (PEF)	2.5	—	3.8	4.4	3.6	3.3	3.1	3.3
M8 (ESF)	2.6	—	3.1	3.6	2.7	1.8	2.9	2.4
ES (FRP)	2.8	—	4.4	5.3	2.4	3.6	1.9	2.9

4.4 浮体構造物のメインテナンス

(1) 水中観察（水中清掃前、後）

本年度、浮体構造物没水部は、ダイバー操作による水中カメラからの映像を陸上TVでモニターし検査した。水中観察は生物の付着した状態（水中清掃前）と水中清掃後の両者について実施し、表4.4.1に示す結果を得た。

表 4.4.1 水中観察結果(陸上モニターTVによる)

水 中 清 掃 前	水 中 清 掃 後
<ul style="list-style-type: none"> ◦付着生物の種類 } の判定可能 付着厚さ ◦塗膜欠陥判定は付着生物が障害となり困難 	<ul style="list-style-type: none"> ◦塗膜欠陥観察は陸上での観察と同程度に可能 ◦生物の除去程度も観察可能 ◦さび汁、はく離等を観察できた。

(注) 但し、いずれも海水の濁り及び浮体の動搖の影響を大きく受ける。

(2) 水中清掃

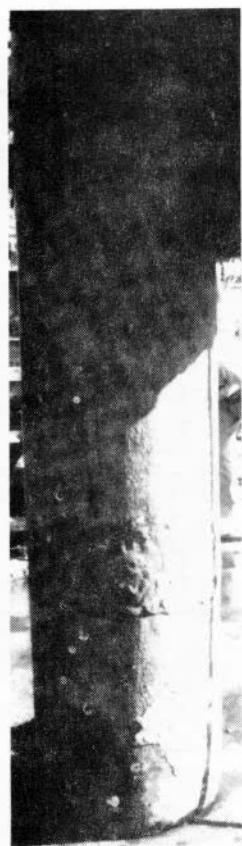
浮体構造物没水部はすでに2回水中清掃を行っているが、前回の水中清掃から1箇年経過した時点で生物除去のため水中清掃を実施した。実験に用いた機器は前回まではエアー式(研究資料No.347参照)であったが、本年度は、よりコンパクトな図4.4.1に示す電動式を用いた。水中清掃作業は強固に付着した生物をコーン型ディスクで荒落しし、仕上をビニール被覆ワイヤーブラシ付ディスクで行った。浮体構造物防食仕様毎の清掃性を表4.4.2に示し、清掃後の各防食仕様の状態を図4.4.2に示す。



図 4.4.1 水中清掃機

* 1回目：S56年10月実施

2回目：S58年10月実施



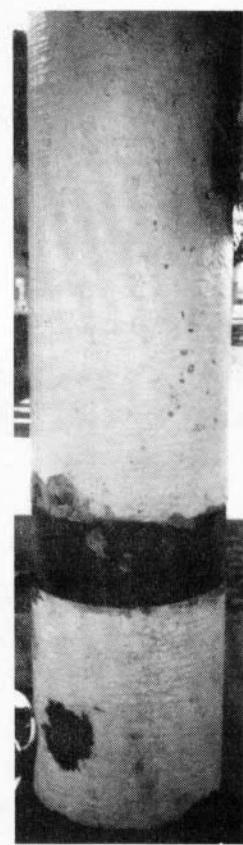
No.6 (PEM)



No.7 (PEF)



No.8 (ESF)



ES(FRP)

図 4.4.2 水中清掃後の状態

表 4.4.2 浮体構造物の清掃性

期間 防食仕様 結果	S. 55.9 ~ S. 56.10		S. 56.10 ~ S. 58.10		S. 58.10 ~ S. 59.9	
	清掃の難易	清掃後の塗膜状態	清掃の難易	清掃後の塗膜状態	清掃の難易	清掃後の塗膜状態
No. 6 (PEM)	△	ふじつぼ台座とれない 凹部多く清掃困難	△	ふじつぼ台座残る 凹部多く清掃困難 黒変部あり	△	凹部多く清掃困難 ふじつぼ台座残る 黒変部あり
No. 7 (PEF)	○	付着生物完全除去	○	若干しみが残る	○	若干しみが残る
No. 8 (FSF)	○~△	わずかにふじつぼの台座が残る	○~△	ふじつぼ台座が若干残る	○~△	ふじつぼ台座が若干残る
ES (FRP)	○	付着生物完全除去	○~△	凹部清掃困難 上塗りのはく離 (一部)	○~△	凹部清掃困難 上塗りのはく離 (一部)

(3) 水中塗装

(a) ダメージの付与

比較的大面積の水中塗装を行うため浮体構造物を S. 58 年 4 月に揚陸させ没水部（水深 1.3 m 付近、20 cm 幅、50 cm 径全周）防食塗膜をエアー工具（チゼル）にて強制はく離した。

(b) ダメージ付与時の状況

- (i) 防食仕様 No. 6：比較的大きな破片（5 cm 口位）でプライマー面からはく離する。プライマー面にさびは認められない。
- (ii) 防食仕様 No. 7：細長い小さな破片（2 ~ 3 cm × 1 cm 位）で徐々にはく離する。素地にさびは認められない。
- (iii) 防食仕様 No. 8：No. 7 と同様である。
- (iv) ES (FRP)：FRP がプライマー面から大面積（20 cm²）ではく離する。プライマー面にはさび 1 ~ 3 % (ASTMD 610 - 68) が一部に認められた。

(c) 水中硬化型塗料による補修

(i) 水中ケレン及び塗装方法

浮体構造物ダメージ付与部は 6 箇月海水中で放置したのち、エアー式の水中清掃機により、付着生物やさびを除去し金属光沢面が露出する程度に水中でケレンした。

塗装方法は表 4.4.3 に示す性状の水中硬化型塗料を用い、ダイバーによるウェットハンド法又はヘラ塗りとした。水中ケレン及び水中塗装は S. 58 年 10 月に実施した。

表 4.4.3 水中硬化型塗料の性状(気中データ)

性状 塗料種	外観	粘度	混合比 (重量)	初期硬化 時間 20°C	可硬時間 20°C	比重 (混合後)
A (エポキシ系)	主剤:白色バテ状 硬化剤:黒色バテ状	高い 流動性なし	主:硬 1:1	2 h	45min	1.6
B (エポキシ系)	主剤:黄色バテ状 硬化剤:黒色バテ状	高い Aより低い	1:1	6 h	1 h	1.4
C (エポキシポリ エステル系)	主剤:白色 硬化剤:半透明	流動性あり	10:1	8 h	40min	1.7
D (ポリエステル系)	主剤:銀色 硬化剤:透明	"	100:1	24 h	15min	1.3

(iii) 補修塗装結果

(1) 補修直後

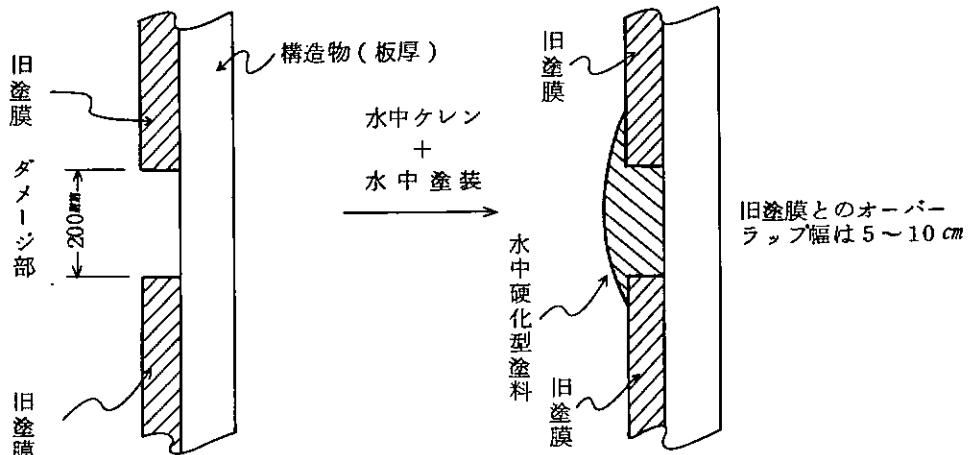
浮体構造物ダメージ付与部の補修範囲を図 4.4.3 に示す。各塗料の補修性は次の様であった。

塗料 A : 防食仕様 No. 8 に適用し、ウェットハンド法で塗装。補修部全周の 1/10 程度に付着したのみで付着不良であった。(残存部は塗料 D でウェット状態にて補修した。)

塗料 B : 防食仕様 No. 6 に適用し、ウェットハンド法で塗装。付着塗膜は補修部全周を被覆している。一部に水を含んだままの状態がある。

塗料 C : 防食仕様 No. 7 に適用し、ヘラ塗りで塗装を行ったが、付着性不良で補修は出来なかった。
(気中ウェット状態にて補修した。)

塗料 D : ES (FRP) に適用し、ヘラ塗りで塗装。付着性は良好で 1 パスで付着する。塗膜は補修部全周を被覆している。



構造物径: 500φ

図 4.4.3 ダメージ部の補修範囲



図 4.4.4 水中補修塗装の状況

(ロ) 1・2箇月経過後の補修部の状態

水中硬化型塗料によるダメージ付与部の補修から約1・2箇月経過した時点で、補修塗膜の状態を調査した。各塗料の状態は次の様である。

塗料A：防食仕様No.8補修部での補修面積は少ないが、水中清掃による塗膜はく離は認められず、塗膜外観にも異常は認められなかった。1・2箇月後の硬化膜は鉛筆硬度H程度である。

塗料B：防食仕様No.6補修部を全周被覆しており水中清掃による塗膜はく離は認められない。補修時、水を含んだ部分でわずかの発さびが認められた。1・2箇月後の硬化膜はF程度である。

塗料C：防食仕様No.7補修部を全周被覆しており、水中清掃による塗膜はく離は認められず、外観にもふくれ等の欠陥はない。1・2箇月後の硬化膜は2H程度である。

塗料D：防食仕様No.8補修部での塗膜は一部はく離が認められ、その部分は水中清掃時にはく落した。更に、旧塗膜との塗り重ね部でも若干の発さびが認められた。ES(FRP)補修部での塗膜は、やや浮き膜となっていたためか、水中清掃時、全周を被覆していた塗膜がすべてはく落した。1・2箇月後の硬化膜はH～3B程度である。

(ハ) 防食仕様No.8、ES(FRP)の再補修

本年度実施した水中清掃によって防食仕様No.8及びES(FRP)のダメージ部に適応していた水中補修塗膜ははく離した。このため、再補修を実施した。補修は電動式水中清掃機で水中ケレンを行ったのち水中硬化型塗料「E」を用いて、ダイバーによるペラ塗りで実施した。

この塗料による補修前、後の状態を図4.4.4に示し、補修に関する施工性調査結果を表4.4.4に示す。

表4.4.4 塗料「E」による再補修、施工性調査結果(水温22℃～23℃)

対象 項目	補修面積	水中ケレン 所要時間	塗料使用量	付着性	水中塗装 所要時間	水中硬化性 (鉛筆硬度)
No.8 (ダメージ部)	0.04m ²	3分	475g	1パス で付着	3分	4日後： 3～4B
ES(FRP) (ダメージ部)	0.45m ²	15分	1,670g	"	25分	14日後：F

(注) 水中硬化型塗料「E」の性状は表4.2.5参照

4.5 上部構造物の調査及びメインテナンス

(1) 外観調査

S 5 6 年度に防食仕様No.1～8を施工した上部構造物を浮体構造物へ増設した。これらの洋上暴露雰囲気における外観調査結果を表 4.5.1 に示す。

表 4.5.1(1) 上部構造物の外観(36箇月後)

対象 防食仕様	パイプ面	立板	フランジ	溶接ビード	天板
No.1	○	○	○	○	○
No.2	"	"	"	"	"
No.3	"	"	"	"	"
No.4	"	"	"	"	"
No.5	"	"	"	"	"
No.6	"	"	"	"	"
No.7	"	"	"	"	"
No.8	"	エッジ部※) 点さび(一部)	"	"	"

(注)(1) 評価 ○：異常なし。但し、チョーキング：No.1, 8 少し

：No.2～7 多し

変色：No.6

(2) ※)仕様No.8：18箇月経過時点より塗装困難なエッジ部で発さび。

進展は著しくない。

(2) 上部構造物のメインテナンス

上部構造物に適応した防食仕様No.1～8は36箇月経過後においても特に異常は認められないが、この時点では塗膜表層が劣化したと仮定し、構造物の一部を塗り替えた。

塗り替え塗装前の素地調整はディスクサンダーにより防食仕様No.1～8 塗膜を中塗り層まで研磨し、再塗装した。

塗装前、後の膜厚及び塗り替え仕様は表 4.5.2 に示す。この施工方法による旧塗膜と塗り替え塗膜との層間付着性は表 4.5.3 に示すがこのデータは上部構造物と同時に作製した試験板を同一処理で塗り替えし調査した。

表4.5.3 塗り替え後の付着力（アトヒージョンテスターによる）

防食 仕様 期間	初期		6箇月後	
	付着力 (kgf/cm²)	破断箇所	付着力 (kgf/cm²)	破断箇所
No.1	29	I Z・c f	40	I Z・c f, ad
	27	I Z・c f	26	I Z・c f
No.2	21	I Z・c f	51	I Z・c f, ad
	28	a d	27	I Z・c f, ad
No.3	26	A C・c f, ad	36	A C・c f, ad
	27	a d	30	a d
No.4	27	a d	29	a d
	22	a d	26	a d
No.5	27	I Z・c f, ad A C・c f A C・c f, ad	62	I Z・c f・ad
	37		65	a d
No.6	42	a d	55	a d
	46		45	a d
No.7	50	a d	110	a d
	43		90	a d
No.8	60	a d	70	a d
	60		45	a d

(注) I Z : 無機ジンク塗料

A C : 下又は中塗り

c f : 塗膜凝集破断

a d : 接着剤の破断

表 4.5.2 上部構造物(試験体), 塗り替え前, 後の膜厚及び塗り替え仕様

箇所 防食 仕様	バイブ面		立板		フランジ		塗り替え仕様 (1 day 1 coat)	
	処理前	処理後	再塗装後	処理前	再塗装後	処理後		
No 1 480~ 550	150~ 200	300 350	390~ 590	100~ 150	250~ 300	350~ 500	150~ 210	280~ 340
No 2 320~ 380	120~ 150	270~ 300	280~ 380	90~ 140	250~ 300	250~ 320	90~ 120	230~ 300
No 3 460~ 500	150~ 190	300~ 350	360~ 500	110~ 180	240~ 300	360~ 550	150~ 200	270~ 330
No 4 350~ 420	150~ 190	300~ 350	270~ 360	100~ 150	220~ 250	250~ 420	80~ 160	220~ 300
No 5 300~ 350	95~ 150	260~ 280	240~ 380	90~ 130	220~ 250	250~ 400	100~ 130	230~ 260
No 6 3000~ 3500	2200~ 2800	3500~ 400	1000~ 1900	500~ 1200	1500~ 1500	1400~ 1800	900~ 1300	1600~ 2200
No 7 1200~ 1300	800~ 1000	1500~ 1800	800~ 1200	500~ 900	1200~ 1500	500~ 1200	300~ 800	1100~ 1500
No 8 1000~ 1100	600~ 750	1200~ 1500	850~ 1000	600~ 750	1300~ 1500	800~ 1300	500~ 800	1200~ 1500

(注) (1) 処理: ティスクサンダーによる目塗膜の研磨 (2) 膜厚: dry (μm) (3) 塗り替え仕様: 表 4.2.4に記した。

4.6 水中メインテナンス試験板

防食仕様№1～8の無塗装ゾーン設定試験板を水中清掃し、図4.6.1に示す要領で表4.2.3に示した3種類の水中硬化型塗料にて水中塗装した。試験板は経年毎に次の調査を行った。

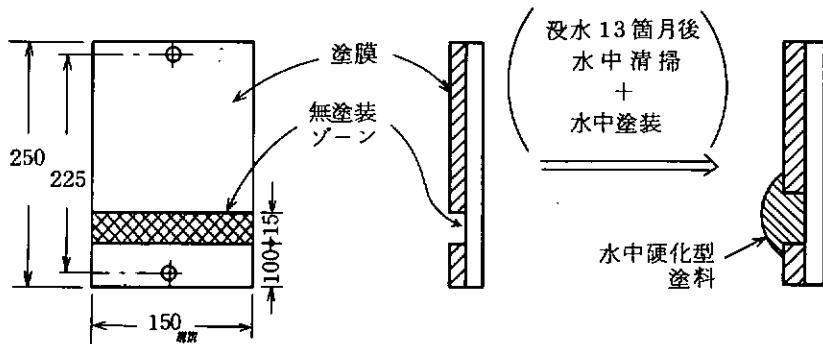


図4.6.1 水中メインテナンス試験板

(1) 生物付着量（試験板は水面下0.5mに浸漬）

試験板での生物付着量測定結果を表4.6.1(1)～(3)に示す。生物種は、いずれの試験板共に類似しており、ちごけむし、ふじつば、ほや類、緑藻、褐藻が主体であった。

表4.6.1(1) 水中硬化型塗料「A」にて補修した試験板

期間 調査 防食 仕様	S.56.10～S.57.10		S.57.10～S.58.10		S.58.10～S.59.10	
	※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)	
	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜
№1	2.7	3.0	0.6	1.0	4.7	2.0
№2	2.5	2.0	0.9	1.4	9.4	1.0
№3	2.7	3.0	0.9	1.2	7.8	1.0
№4	2.3	2.0	0.9	1.0	10.3	1.0
№5	2.8	2.0	1.1	1.0	3.2	1.0
№6	2.7	2.0	0.7	1.0	3.2	1.0
№7	1.9	2.0	0.5	3.2	10.9	1.0
№8	2.3	3.0	0.9	1.6	7.8	1.0

(注) ※付着量kg/m²(Wet), 旧塗膜3.2dm², 補修塗膜0.5dm²からの換算

表 4.6.1(2) 水中硬化型塗料「B」にて補修した試験板

期間 調査 防食 仕様	S.56.10～S.57.10		S.57.10～S.58.10		S.58.10～S.59.10	
	※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)	
	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜
No 1	2.8	2.0	0.6	1.2	4.7	0.6
No 2	2.7	2.0	0.8	1.0	9.4	1.0
No 3	3.1	6.0	0.7	1.4	6.3	1.0
No 4	2.5	4.0	0.9	1.0	9.4	1.0
No 5	2.7	5.0	1.0	1.0	6.3	1.6
No 6	2.5	2.0	0.8	1.0	6.6	0.8
No 7	1.9	2.0	0.6	1.4	7.8	1.0
No 8	2.7	3.0	0.8	1.6	14.1	1.0

(注) ※付着量kg/m²(Wet), 旧塗膜3.2dm², 補修塗膜0.5dm²からの換算

表 4.6.1(3) 水中硬化型塗料「C」にて補修した試験板

期間 調査 防食 仕様	S.56.10～S.57.10		S.57.10～S.58.10		S.58.10～S.59.10	
	※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)		※付着量kg/m ² (Wet)	
	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜	旧塗膜	補修塗膜
No 1	2.0	2.1	0.7	1.1	5.0	0.7
No 2	2.7	1.4	0.7	1.0	5.0	0.7
No 3	1.7	1.4	0.7	1.3	6.6	1.4
No 4	1.5	1.4	0.8	1.3	8.3	1.7
No 5	3.3	4.3	0.8	1.1	3.9	0.5
No 6	2.0	1.4	0.8	1.1	9.9	1.4
No 7	1.7	1.4	0.7	0.9	6.6	2.1
No 8	1.5	1.4	0.7	1.3	11.6	2.1

(注) ※付着量kg/m²(Wet), 旧塗膜3dm², 補修塗膜0.7dm²からの換算

(2) 生物除去後の状態

試験板の付着生物は、陸上にてスケラを用いて除去した。この方法で生物除去した防食仕様No 1～8の塗膜及び補修塗膜の状態を表 4.6.2 に示す。

表 4.6.2(3) 生物除去後の状態(36箇月)

対象 防食 仕様	水中硬 化型塗料	水 中 補 修 試 験 板		
		旧 塗 膜	旧塗膜と補修塗膜の境界	補 修 塗 膜
No 2	A	○	○	○
	B	さび 10φ位1ヶ	"	"
	C	○	"	"
No 2	A	さび 10φ位1ヶ	はく離(2~3cm ²)	はく離(2~3cm ²)
	B	さび ○ 立1ヶ	○	○
	C	"	"	"
No 3	A	"	ややはく離(ほぼ全面)	ややはく離(ほぼ全面)
	B	"	○	○
	C	"	"	"
No 4	A	さび 15φ位1ヶ	"	"
	B	○	"	"
	C	"	"	"
No 5	A	"	"	"
	B	"	"	"
	C	"	"	"
No 6	A	"	"	"
	B	"	"	"
	C	"	"	"
No 7	A	"	"	"
	B	"	"	"
	C	"	"	"
No 8	A	"	"	"
	B	"	"	"
	C	"	"	"

(注) ○:生物除去によるダメージなし

12及び24箇月経過後では、いずれの組み合せも異常はなかった。

4.7 洋上大気暴露試験板

S 5.6 年度に洋上火気暴露雰囲気へ設置した防食仕様 No. 1 ~ 8 の試験板並びに S.5.7 年度、それらの無塗装ゾーン設定部を、補修塗装した試験板について下記に示す調査を行った。

(1) 外観調査

洋上暴露雰囲気にて 3.6箇月経過した無加工及び無塗装ゾーン設定試験板の調査結果を表 4.7.1(1) に示す。

更に、同雰囲気にて 2.4箇月経過した無塗装ゾーン補修試験板の調査結果を表 4.7.1(2) に示す。

(2) 付着力試験

測定は、塗膜にエポキシ系溶剤型接着剤を用いて測定用端子（以下ドリー）を接着させ、2.4時間経過後、鋭利な刃物でドリー円周に沿って素地まで達する切り傷を入れアドヒージョンテスター（エルコメータ社製）にて付着力を測定した。防食仕様 No. 1 ~ 8 塗膜の初期～3.6箇月経過後の調査結果を表 4.7.3 に示す。

(3) インピーダンスの測定

測定は、3% 食塩水にカルボキシルメチルセルロース（CMC）を溶解させた電解質の糊で Al 箔を塗膜表面へ貼付し、電研式塗膜劣化検査器により発振周波数毎の抵抗値及び容量値を測定した。

防食仕様 No. 1 ~ 8 の無加工試験板の初期～3.6箇月経過後の測定結果を表 4.7.4 に示し無塗装ゾーン補修試験板の初期～2.4箇月経過後の測定結果を表 4.7.5 に示す。なお各試験板の初期から現在までの $\tan \delta$ を表 4.7.6 に示す。

表 4.7.1(1) 無加工試験板（3.6箇月後）

対象 防食仕様	さび	われ	ふくれ	退色
No. 1	○	○	○	チョーキング 小
No. 2	"	"	"	" 大
No. 3	"	"	"	"
No. 4	"	"	"	"
No. 5	"	"	"	"
No. 6	"	"	"	表面白化
No. 7	"	"	"	チョーキング 大
No. 8	"	"	"	" 小

（注）評価 ○：異常なし

表 4.7.1(2) 無塗装ゾーン設定試験板（3.6箇月後）

対象 防食仕様	無塗装ゾーン	塗膜との境界部
No. 1	褐色さび	○
No. 2	"	"
No. 3	"	"
No. 4	"	"
No. 5	"	"
No. 6	"	"
No. 7	"	"
No. 8	"	"

（注）○：異常なし

表 4.7.2 無塗装ゾーン補修塗膜の外観(24箇月後)

防食仕様	※処理\対象	さび	われ	旧塗膜との境界部	退色
No.1	S	○	○	○	チョーキング 小
	P	"	"	"	"
No.2	S	"	"	"	" 大
	P	"	"	"	"
No.3	S	"	"	"	"
	P	"	"	"	"
No.4	S	"	"	"	"
	P	"	"	"	"
No.5	S	"	"	"	" 小
	P	"	"	"	"
No.6	S	"	"	"	" 大
	P	"	"	"	"
No.7	S	"	"	"	"
	P	"	"	"	"
No.8	S	"	"	"	"
	P	"	"	"	"

(注) (1) ※処理: S; サンドブラスト, P; パワーツール

(2) 評価: ○; 異常なし

表 4.7.3 付着力試験結果(初期～42箇月後まで)

期間 防食様 仕様	暴 露 前		6 節月 後		12 節月 後		18 節月 後		24 節月 後		30 節月 後		36 節月 後		42 節月 後		
	付着力	破断箇所	付着力	破断箇所	付着力	破断箇所											
No 1 34	AC . Cf	30	AC . Cf	32	I Z . Cf	28	ACCf.IZCf	28	ACCf	28	ACCf						
No 2 35	ad	32	I Z . Cf	31	I Z . Cf	30	I Z . Cf	32	I Z . Cf	25	I Z . Cf	24	I ZCf	28	I ZCf	26	I ZCf
No 3 40	AC . Cf	38	AC . Cf	36	AC . Cf	52	AC . Cf	50	AC . Cf	35	AC . Cf	33	ACCf.ad	32	ad	50	ACCf
No 4 38	ad	48	ad	53	ad	41	ad	65	ad	40	ad	38	ad	30	ad	36	ad
No 5 33	I Z . Cf	30	AC . Cf	33	AC . Cf	24	AC . Cf	60	ACCf.ad	25	AC . Cf	20	ACCf.IZCf.ad	23	I ZCf.ACCf	26	I ZCf.ACCf
No 6 45	ad	45	ad . Cf	50	ad	22	ad	30	"	28	AC . Cf	28	ad	62	ad	50	ad
No 7 40	ad	75	ad	55	ad	55	ad	70	ad	55	ad	60	ad	100	ad	90	ad
No 8 36	ad	30	"	40	ad	60	Cf	50	ad	60	"	70	"	50	ad	50	ad
		35	"	46	Cf	56	ad	60	"	60	"	20	Cf . ad	55	ad	55	ad

(注) (1) 付着力: kgf/cm² (2) 破断箇所の略号

ad : 接着剤はがれ

AC : 下塗り塗膜

Cf : 塗膜の剥離破断

IZ : 無機シングル塗膜

表 4.7.4(1) インピーダンス測定結果(無加工試験板)

防食 仕様No.	期間 項目	暴 露 前				暴 露 6箇月			
		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No. 1	0.2	0.0045	3000			0.2	0.0041	4000	
	0.5	0.0043	2000			0.5	0.0040	3000	
	1.0	0.0043	2000			1.0	0.0041	2000	
	2.0	0.0041	1000			2.0	0.0040	1400	
No. 2	0.2	0.0055	2000			0.2	0.0048	3000	
	0.5	0.0052	1000			0.5	0.0046	2000	
	1.0	0.0052	700			1.0	0.0047	1500	
	2.0	0.0050	500			2.0	0.0045	1000	
No. 3	0.2	0.0047	2000			0.2	0.0046	4000	
	0.5	0.0045	1500			0.5	0.0045	3000	
	1.0	0.0045	1000			1.0	0.0045	2000	
	2.0	0.0043	700			2.0	0.0043	1000	
No. 4	0.2	0.0037	3000			0.2	0.0035	5000	
	0.5	0.0036	2000			0.5	0.0034	3000	
	1.0	0.0036	1500			1.0	0.0035	2000	
	2.0	0.0035	1000			2.0	0.0033	1000	
No. 5	0.2	0.0046	2000			0.2	0.0044	4000	
	0.5	0.0044	1500			0.5	0.0043	2000	
	1.0	0.0044	1000			1.0	0.0044	1500	
	2.0	0.0042	800			2.0	0.0042	1000	
No. 6	0.2	0.0026	5000			0.2	0.0026	6000	
	0.5	0.0025	4000			0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0024	4000			1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	3000			2.0	0.0024	2000	
No. 7	0.2	0.0031	5000			0.2	0.0031	4000	
	0.5	0.0030	4000			0.5	0.0030	2000	
	1.0	0.0030	3000			1.0	0.0031	1400	
	2.0	0.0028	2000			2.0	0.0029	1000	
No. 8	0.2	0.0031	5000			0.2	0.0029	6000	
	0.5	0.0030	4000			0.5	0.0028	4000	
	1.0	0.0030	4000			1.0	0.0029	3000	
	2.0	0.0029	3000			2.0	0.0028	2000	

(注) (1) Aℓ箔 : 5 × 20 cm²で実施

(2) 項 目 : f : 発振周波数

C : 容 量

R : 抵抵抗

表 4.7.4(2) インピーダンス測定結果(無加工試験片)

期間 項目 防食 仕様No.	暴露 12箇月				暴露 18箇月			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No. 1	0.2	0.0041	4000		0.2	0.0028	7000	
	0.5	0.0040	2500		0.5	0.0028	4000	
	1.0	0.0041	2000		1.0	0.0029	2000	
	2.0	0.0039	1000		2.0	0.0027	1000	
No. 2	0.2	0.0048	3000		0.2	0.0031	6000	
	0.5	0.0047	2300		0.5	0.0030	3000	
	1.0	0.0048	1300		1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0046	700		2.0	0.0029	1000	
No. 3	0.2	0.0047	4000		0.2	0.0031	6000	
	0.5	0.0046	2500		0.5	0.0030	4000	
	1.0	0.0047	2000		1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0045	1000		2.0	0.0029	1000	
No. 4	0.2	0.0026	4000		0.2	0.0028	7000	
	0.5	0.0025	3000		0.5	0.0027	4000	
	1.0	0.0025	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0024	1000		2.0	0.0027	1500	
No. 5	0.2	0.0026	5000		0.2	0.0031	6000	
	0.5	0.0024	4000		0.5	0.0030	3000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0029	1500	
No. 6	0.2	0.0024	6000		0.2	0.0024	8000	
	0.5	0.0023	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	2500	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0023	2000	
No. 7	0.2	0.0031	4000		0.2	0.0026	7000	
	0.5	0.0021	2000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0031	1500		1.0	0.0026	2500	
	2.0	0.0028	1000		2.0	0.0025	2000	
No. 8	0.2	0.0030	6000		0.2	0.0026	7000	
	0.5	0.0028	4000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0030	3000		1.0	0.0026	2500	
	2.0	0.0028	2000		2.0	0.0024	2000	

(注) Aℓ箔: 5 × 20 cm (12箇月後)

5 × 5 cm (18箇月後)

表 4.7.4(3) インピーダンス測定結果(無加工試験板)

期間 項目 防食 仕様No	暴露 24箇月				暴露 30箇月			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No 1	0.2	0.0029	6000		0.2	0.0030	5000	
	0.5	0.0028	4500		0.5	0.0029	3000	
	1.0	0.0030	2000		1.0	0.0030	2000	
	2.0	0.0027	1000		2.0	0.0028	1000	
No 2	0.2	0.0031	6500		0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0031	3500		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0032	2000		1.0	0.0025	2500	
	2.0	0.0030	1500		2.0	0.0023	1500	
No 3	0.2	0.0030	6000		0.2	0.0032	5000	
	0.5	0.0030	4000		0.5	0.0031	3000	
	1.0	0.0031	3000		1.0	0.0032	2000	
	2.0	0.0029	1000		2.0	0.0030	1000	
No 4	0.2	0.0027	8000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0027	5000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	3000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0026	2000		2.0	0.0026	1500	
No 5	0.2	0.0029	8000		0.2	0.0026	3000	
	0.5	0.0029	4000		0.5	0.0024	2000	
	1.0	0.0030	2000		1.0	0.0025	1500	
	2.0	0.0028	1000		2.0	0.0023	1000	
No 6	0.2	0.0024	8000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	6000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	2500	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0023	2000	
No 7	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0026	7000	
	0.5	0.0025	3000		0.5	0.0026	4000	
	1.0	0.0027	2000		1.0	0.0027	2000	
	2.0	0.0025	1000		2.0	0.0025	1500	
No 8	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0025	6000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	

(注) Aθ 箔: 5 × 5 cm

表 4.7.4(4) インピーダンス測定結果(無加工試験板)

防食 仕様No.	期間 項目	3 6箇月				4 2箇月			
		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No. 1	0.2	0.0033	4000			0.2	0.0025	5000	
	0.5	0.0032	3000			0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0033	2000			1.0	0.0025	2000	
	2.0	0.0031	1000			2.0	0.0023	1000	
No. 2	0.2	0.0036	4000			0.2	0.0033	5000	
	0.5	0.0035	2500			0.5	0.0032	3000	
	1.0	0.0036	1500			1.0	0.0033	2000	
	2.0	0.0034	900			2.0	0.0031	1000	
No. 3	0.2	0.0035	5000			0.2	0.0031	5000	
	0.5	0.0034	3000			0.5	0.0030	3000	
	1.0	0.0035	2000			1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0033	1000			2.0	0.0029	1000	
No. 4	0.2	0.0029	5000			0.2	0.0027	5000	
	0.5	0.0028	3000			0.5	0.0027	4000	
	1.0	0.0029	2500			1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0028	1500			2.0	0.0026	1000	
No. 5	0.2	0.0034	4000			0.2	0.0031	5000	
	0.5	0.0033	2300			0.5	0.0030	3000	
	1.0	0.0034	1200			1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0032	800			2.0	0.0029	1000	
No. 6	0.2	0.0025	7000			0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0024	4000			0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000			1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000			2.0	0.0023	2000	
No. 7	0.2	0.0027	5000			0.2	0.0026	6000	
	0.5	0.0027	3000			0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0027	2000			1.0	0.0025	2000	
	2.0	0.0026	1500			2.0	0.0024	1500	
No. 8	0.2	0.0026	7000			0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0026	4000			0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0027	3200			1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0025	2000			2.0	0.0023	2000	

(注) Aℓ箔: 5 × 5 cm

表 4.7.5(1) 無塗装ゾーン補修試験板のインピーダンス(3箇月後)

補修前処理 防食項目 仕様No	S a 3				S t 3			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No 1	0.2	0.0029	6000		0.2	0.0030	6000	
	0.5	0.0028	4000		0.5	0.0029	4000	
	1.0	0.0029	2000		1.0	0.0030	2000	
	2.0	0.0027	1000		2.0	0.0028	1300	
No 2	0.2	0.0028	5000		0.2	0.0028	6000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0027	1000		2.0	0.0027	1500	
No 3	0.2	0.0026	5000		0.2	0.0026	6000	
	0.5	0.0026	3000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0027	2500		1.0	0.0026	2000	
	2.0	0.0025	1500		2.0	0.0025	1300	
No 4	0.2	0.0027	5000		0.2	0.0027	5000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0026	4000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0027	2000	
	2.0	0.0026	1500		2.0	0.0026	1400	
No 5	0.2	0.0029	4000		0.2	0.0028	6000	
	0.5	0.0028	3000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0029	1500		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0028	1000		2.0	0.0027	1000	
No 6	0.2	0.0024	8000		0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0024	6000		0.5	0.0023	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0023	2000	
No 7	0.2	0.0024	7000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	4000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0023	3000		2.0	0.0024	2000	
No 8	0.2	0.0025	6000		0.2	0.0025	8000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0025	4000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	3000		2.0	0.0024	2000	

(注) (1) Aℓ箔: 5 × 5 cm

(2) 項目: f : 発振周波数

C : 容量

R : 抵抗

表 4.7.5(2) 無塗装ゾーン補修試験板のインピーダンス(12箇月後)

補修前処理 防食項目 仕様No.	S a 3				S t 3			
	f (KHz)	C (μF)	R (kΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (kΩ)	
No. 1	0.2	0.0029	6000		0.2	0.0029	6000	
	0.5	0.0028	4000		0.5	0.0028	4000	
	1.0	0.0029	3000		1.0	0.0029	3000	
	2.0	0.0027	2000		2.0	0.0027	2000	
No. 2	0.2	0.0028	7000		0.2	0.0028	7000	
	0.5	0.0027	4000		0.5	0.0027	4000	
	1.0	0.0028	3000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0027	2000		2.0	0.0026	1000	
No. 3	0.2	0.0026	7000		0.2	0.0026	7000	
	0.5	0.0025	4000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0025	2000		2.0	0.0025	2000	
No. 4	0.2	0.0028	6000		0.2	0.0027	6000	
	0.5	0.0026	4000		0.5	0.0026	4000	
	1.0	0.0027	3000		1.0	0.0027	3000	
	2.0	0.0026	2000		2.0	0.0026	2000	
No. 5	0.2	0.0027	5000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0027	4000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	3000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0026	2000		2.0	0.0027	1000	
No. 6	0.2	0.0023	8000		0.2	0.0025	8000	
	0.5	0.0024	6000		0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0023	2000	
No. 7	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0025	8000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	
No. 8	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	

(注) Aℓ箔: 5 × 5 cm

表 4.7.5(3) 無塗装ゾーン補修試験板のインピーダンス(18箇月後)

補修前処理 防食項目 仕様No.	S a 3				S t 3			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No. 1	0.2	0.0029	6000		0.2	0.0031	6000	
	0.5	0.0028	4000		0.5	0.0030	4000	
	1.0	0.0029	3000		1.0	0.0031	2000	
	2.0	0.0027	2000		2.0	0.0028	1000	
No. 2	0.2	0.0028	7000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0027	4000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	3000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0027	2000		2.0	0.0027	1000	
No. 3	0.2	0.0026	7000		0.2	0.0026	6000	
	0.5	0.0025	4000		0.5	0.0025	3000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0026	2000	
	2.0	0.0025	2000		2.0	0.0025	1500	
No. 4	0.2	0.0028	6000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0026	4000		0.5	0.0028	3500	
	1.0	0.0027	3000		1.0	0.0029	2500	
	2.0	0.0026	2000		2.0	0.0027	1500	
No. 5	0.2	0.0027	5000		0.2	0.0029	5000	
	0.5	0.0027	4000		0.5	0.0028	3000	
	1.0	0.0028	3000		1.0	0.0029	2000	
	2.0	0.0026	2000		2.0	0.0027	1000	
No. 6	0.2	0.0023	8000		0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0024	6000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0023	2000	
No. 7	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0026	2000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	1600	
No. 8	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0024	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0023	2000	

(注) Aℓ 箔: 5 × 5 cm

表 2.7.5(4) 無塗装ゾーン補修試験板のインピーダンス(24箇月後)

防食 仕様No	S a 3				S t 3			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No 1	0.2	0.0032	4000		0.2	0.0029	5000	
	0.5	0.0032	3000		0.5	0.0028	3000	
	1.0	0.0033	1500		1.0	0.0029	2000	
	2.0	0.0031	1000		2.0	0.0028	1500	
No 2	0.2	0.0030	5000		0.2	0.0030	5000	
	0.5	0.0029	3000		0.5	0.0029	3000	
	1.0	0.0030	2000		1.0	0.0030	2000	
	2.0	0.0028	1500		2.0	0.0028	1500	
No 3	0.2	0.0027	4000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0026	3000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0027	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0025	1000		2.0	0.0026	1000	
No 4	0.2	0.0028	5000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0029	2000	
	2.0	0.0026	1500		2.0	0.0027	1500	
No 5	0.2	0.0029	4000		0.2	0.0031	4000	
	0.5	0.0028	3000		0.5	0.0030	2500	
	1.0	0.0029	2000		1.0	0.0031	1500	
	2.0	0.0027	1000		2.0	0.0029	1000	
No 6	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	6000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0024	2000	
No 7	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0025	8000	
	0.5	0.0024	4000		0.5	0.0024	5000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	
No 8	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0025	8000	
	0.5	0.0024	4000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	

(注) Aφ箔: 5 × 5 cm

表 4.7.5(5) 無塗装ゾーン補修試験板のインピーダンス(30箇月後)

補修前処理 防食項目 仕様No.	S a 3				S t 3			
	f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)		f (KHz)	C (μF)	R (KΩ)	
No. 1	0.2	0.0028	6000		0.2	0.0029	5000	
	0.5	0.0027	4000		0.5	0.0028	3000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0029	2000	
	2.0	0.0027	1500		2.0	0.0028	1500	
No. 2	0.2	0.0027	6000		0.2	0.0028	6000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0027	4000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0026	1000		2.0	0.0027	1000	
No. 3	0.2	0.0026	4000		0.2	0.0026	5000	
	0.5	0.0025	3000		0.5	0.0025	4000	
	1.0	0.0027	2000		1.0	0.0026	2000	
	2.0	0.0025	1000		2.0	0.0024	1000	
No. 4	0.2	0.0027	5000		0.2	0.0027	5000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0026	3000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0026	1000		2.0	0.0026	1000	
No. 5	0.2	0.0028	4000		0.2	0.0028	5000	
	0.5	0.0027	3000		0.5	0.0027	3000	
	1.0	0.0028	2000		1.0	0.0028	2000	
	2.0	0.0027	1000		2.0	0.0026	1000	
No. 6	0.2	0.0025	8000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0023	2000		2.0	0.0023	2000	
No. 7	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	5000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0025	3000		1.0	0.0026	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	
No. 8	0.2	0.0025	7000		0.2	0.0025	7000	
	0.5	0.0024	4000		0.5	0.0024	4000	
	1.0	0.0026	3000		1.0	0.0025	3000	
	2.0	0.0024	2000		2.0	0.0024	2000	

(注) Aℓ 箔: 5 × 5 cm

表 4.7.6(1) 無加工試験板の経時tanδ

期間 項目 防食 仕様	経時の tan δ (1 kHz)							
	※ 暴露前	※ 6箇月	※ 12箇月	18箇月	24箇月	30箇月	36箇月	42箇月
No 1	0.019	0.019	0.019	0.027	0.027	0.027	0.024	0.032
No 2	0.044	0.023	0.025	0.026	0.024	0.025	0.029	0.024
No 3	0.035	0.018	0.017	0.021	0.017	0.025	0.023	0.026
No 4	0.029	0.023	0.032	0.028	0.019	0.028	0.022	0.028
No 5	0.036	0.024	0.021	0.026	0.027	0.037	0.039	0.026
No 6	0.017	0.020	0.021	0.025	0.021	0.025	0.021	0.021
No 7	0.018	0.037	0.034	0.031	0.029	0.029	0.029	0.032
No 8	0.013	0.018	0.018	0.024	0.020	0.020	0.020	0.021

(注) (1) ※ : Al箔: 5 × 20 cm, 他は 5 × 5 cm

(2) 表 4.7.4 の各値より式 $\tan \delta = \frac{1}{2 \pi f C R}$ で求めた。

表 4.7.6(2) 無塗装ゾーン補修試験板の経時tanδ

期間 防食 仕様 処理	暴露 3箇月		暴露 12箇月		暴露 18箇月		暴露 24箇月		暴露 30箇月	
	Sa 3	St 3	Sa 3	St 3	Sa 3	St 3	Sa 3	St 3	Sa 3	St 3
No 1	0.027	0.027	0.018	0.018	0.027	0.026	0.027	0.033	0.028	0.027
No 2	0.028	0.028	0.019	0.028	0.037	0.028	0.027	0.027	0.028	0.028
No 3	0.024	0.031	0.020	0.020	0.029	0.031	0.028	0.029	0.029	0.031
No 4	0.028	0.029	0.019	0.020	0.028	0.022	0.027	0.028	0.028	0.028
No 5	0.037	0.028	0.019	0.028	0.027	0.027	0.034	0.027	0.028	0.028
No 6	0.021	0.021	0.021	0.021	0.025	0.021	0.021	0.021	0.023	0.023
No 7	0.016	0.021	0.021	0.020	0.025	0.031	0.020	0.020	0.023	0.020
No 8	0.016	0.021	0.021	0.021	0.025	0.021	0.020	0.020	0.020	0.023

(注) (1) Al箔: 5 × 5 cm

(2) 表 4.7.5 の各値から式 $\tan \delta = \frac{1}{2 \pi f C R}$ で求めた。

4.8 水中硬化型塗料によるメインテナンスの検討

海洋構造物の各部位にあって①鋼材腐食の著しい飛沫部②防食皮膜が機械的ダメージを受け易く、かつ電気防食効果が充分に及ばない干満部③波浪の影響の大きい水線付近などを対象に、メインテナンス方法の指針を得るため、水中硬化型塗料の実験を行った。

(1) 補修用塗料

補修に用いた水中硬化型塗料は表 4.2.3 に示した塗料 A, B 及び C の 3 種である。

(2) 実験の組み合わせ

海洋構造物の飛沫部、干満部、没水部（水線近傍）を補修の対象とし、各部位における維持補修の指針を得るため表 4.8.1 に示すような条件を組み合せた。

表 4.8.1 水中硬化型塗料実験の組合せ

対象部位 下地の 状態 要因	飛沫帶			干満潮帶		没水部（水線付近）	
	さび面	プラスト面	※ 旧塗膜	さび面	プラスト面	防食仕様 No.1～8旧塗膜	さび面
1. 塗料種	3	3	3	3	3	3	3
2. 被塗面 霧囲気	Dry	Dry	Dry	Dry	Dry	水中	水中
3. ケレン種	手工具 Power Tool	プラスト		手工具 Power Tool	プラスト	水中清掃	水中清掃
4. ケレン～塗装 インターバル	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h	0.24 h	0, 6, 24 h
5. 没水までの インターバル	—	—	—	0 h 3 h 6 h	0 h 3 h	—	—
6. 垢生	—	—	—	(ポリエチレン) シート ネット なし	—	—	(ポリエチレン) シート ネット なし
備考			※ No.6 7 8 ES(FRP)				

(注) ※試験板の発さび状態、補修前下地処理等の詳細は研究資料 No.357

参照のこと。

(3) 実験結果

(a) 外観調査

水中硬化型塗料にて補修した各試験板の経時の外観調査結果を表 4.8.2(1)～(8)に示す。

表4.8.2(1) 飛沫部の外観(12箇月後)

下地 塗料	鏡面			旧塗膜(浮体試験構造物)			
	手工具 処理	パワーツール 処理	プラスト 処理	PEM (No.6)	PEF (No.7)	ESF (No.8)	ES FRP
A	○	○	○	○	○	○	○
B	"	"	"	"	"	"	"
C	"	"	"	"	"	"	"

(注) 評価 ○:異常なし。但し、ショーキングA, B>C

表4.8.2(2) 飛沫部の外観(24箇月後)

下地 塗料	鏡面			旧塗膜(浮体試験構造物)			
	手工具 処理	パワーツール 処理	プラスト 処理	PEM (No.6)	PEF (No.7)	ESF (No.8)	ES FRP
A	○	○	○	○	○	○	○
B	"	"	"	"	"	はく離 5%	"
C	"	"	"	"	"	○	"

(注) 評価 ○:異常なし。但し、ショーキングA, B>C

表4.8.2(3) 干満部の外観(対象:鏡面)(12箇月後)

処理 没水泡の インター バル(h) 養生 塗料	手工具			パワーツール				プラスト		
	0		3	6	0		3	6	0	3
	ネット	シート	なし	なし	なし	ネット	シート	なし	なし	なし
A	○	○	○	○	○	※○	※○	※○	○	○
B	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
C	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

(注) (1) シート:補修後7日経過した時点で除去

(2) 評価○:異常なし

(3) ※:ふじつば, かきの付着大

表4.8.2(4) 干満部の外観(対象:さび面)(24箇月後)

処理 没水泡の インター バル(h) 養生 塗料	手工具			パワーツール				プラスト		
	0		3	6	0		3	6	0	3
	ネット	シート	なし	なし	なし	ネット	シート	なし	なし	なし
A	○	○	流出	○	はく離 100%	○	○	○	○	○
B	"	"	○	はく離 100%	"	"	"	"	"	"
C	"	"	"	○	○	"	"	"	"	"

(注) 評価 ○:異常なし

表 4.8.2(5) 没水部の外観(対象:さび面)(12箇月後)

処理 養生 塗料	水中清掃 塗装までのインターバル:0			同 左 塗装までのインターバル:6h			同 左 塗装までのインターバル:24h		
	※ ネット	シート	なし	※ ネット	シート	なし	※ ネット	シート	なし
A	○	○	はく離 100%	○	○	○	○	○	はく離 80%
B	"	"	○	"	はく離 10%	"	"	○	○
C	"	"	"	"	"	"	"	"	"

(注) (1)シート:補修後7日経過した時点で除去

(2)評価○:異常なし。※ネット内のふじつぼ成長によりネットが持ち上げられている。
試験板への生物付着は緑藻、ふじつぼが主体である。

表 4.8.2(6) 没水部の外観(対象:さび面)(24箇月後)

処理 養生 塗料	水中清掃			同 左			同 左		
	ネット	シート	なし	ネット	シート	なし	ネット	シート	なし
A	○	○	-	○	○	はく離 100%	○	はく離 100%	-
B	"	"	"	"	※"	○	"	○	○
C	"	"	"	"	※"	"	"	"	"

(注) (1)※12箇月後再補修

(2)評価○:異常なし。試験板への生物付着は緑藻、褐藻、ふじつぼが主体

表 4.8.2(7) 没水部の外観(対象:旧塗膜)(12箇月後)

処理 塗装 塗料	水中清掃													
	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	No.7	No.8	
防食仕様(旧塗膜 塗装インターバルh)	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24
A	○	○	はく離 100%	○	○	○	○	○	○	○	はく離 100%	○	○	○
B	"	"	ふくれ No.2F	"	"	"	"	"	"	"	"	○	"	"
C	"	"	○	"	"	"	"	"	"	"	はく離 10%	"	"	"

(注) (1)評価○:異常なし

(2)A, B, C, 塗膜上の生物(緑藻、褐藻、ふじつぼは、スケラにて除去)

(3)ふくれ: ASTM, D 714による。

表 4.8.2(8) 没水部の外観(対象:旧塗膜)(24箇月後)

塗料	ケイシ 防食仕様 塗装インター バル(h)	水中清掃													
		No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6		No.7	
		0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24	0	24
A		○	○	-	はく離 100 %	○	○	はく離 50 %	はく離 100 %	○	○	○	-	○	○
B	"	はく離 15 %	ふくれ No2 F	はく離 20 %	ふくれ No2 F	ふくれ 10φ 1ヶ	ふくれ No2 F	はく離 20 %	ふくれ No2 F M	"	"	はく離 30 %	ふくれ No2 1ヶ	はく離 10 %	"
C	"	○	○	○	○	○	○	○	○	"	"	(はく離 100 %)	○	"	○

(b) 付着力試験

水中硬化型塗料3種による補修試験板の経時付着力を表4.8.3(1)~(4)に示す。但し、初期値は、経年後の調査に対するプランク的意図から没水迄のインターバルを対象としていない。経年後の値は試験板全数とせず代表的なもののみについて実施した。

表4.8.3(1) 飛沫部の付着力試験結果(対象:さび面)

処理 期間 塗料	手 工 具			パワーツール			ブ ラ ス ト		
	初 期	12箇 月 後	24箇 月 後	初 期	12箇 月 後	24箇 月 後	初 期	12箇 月 後	24箇 月 後
A	40 (pf100)			50 (ad100)			55 (ad100)		
	50 (pf100)	5 (pf100)	5 (pf100)	58 (ad100)	33 (ad100)	30 (pf80) cf20	60 (ad100)	50 (ad100)	45 (ad100)
B	41 (pf100)			64 (ad100)			60 (ad100)		
	42 (pf100)	18 (ad100)	30 (pf100)	62 (ad100)	21 (ad100)	75 cf 5 ad95	65 (ad100)	35 (ad100)	60 (ad100)
C	40 (pf100)			58 (ad100)			52 (ad100)		
	39 cf20 ad80	16 (pf70) ad30	10 (pf70) ad30	51 (ad100)	20K (ad100)	35 (pf100)	57 (ad100)	40 (ad100)	65 (ad100)

(注) (1)付着力; kgf/cm², ()内は破断形態とその面積(%)

(2)破断形態の略号

(2)破断形態の略号	$\left\{ \begin{array}{l} ad : \text{接着剤はがれ} \\ cf : \text{塗膜の凝集破断} \\ pf : \text{素地からの破断} \end{array} \right.$
------------	---

表 4.8.3(2) 干溝部の付着力試験結果（対象：さび面）

処理 漆料 期間 塗料	手 工 具						バ ワ ッ タ ル						ブ ラ ス ト																	
	初 期			1 2箇月後			2 4箇月後			初 期			1 2箇月後			2 4箇月後			初 期			1 2箇月後			2 4箇月後					
-	0	3	6	0	3	6	-	0	3	6	0	3	6	-	0	3	6	-	0	3	6	-	0	3	6	-	0	3		
A 漆料 期間 塗料	40 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	-	15 (Pf100)	-	15 (Pf100)	59 (Cf100)	32 (Cf100)	17 (Pf100)	28 (Pf50) ad 50	25 (Pf20) Cf 80	18 (Pf100)	30 (Pf100)	60 (ad100)	40 (ad100)	Pf 35 Cf 45 ad 20	35 ad 20	40 (ad100)	28 (Cf 20)	Pf 80 Cf 20						
	45 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	5 (Pf100)	-	15 (Pf100)	-	15 (Pf100)	50 (Cf100)	30 (Cf100)	17 (Pf100)	28 (Pf50) ad 50	25 (Pf20) Cf 80	18 (Pf100)	30 (Pf100)	55 (ad100)	30 (ad100)	Cf 45 ad 20	35 ad 20	40 (ad100)	28 (Cf 20)	Pf 80 Cf 20						
B 漆料 期間 塗料	30 (Pf100)										65 (Pf100)							65 (ad100)												
	28 (Pf100)	5 (Pf100)	18 (Pf100)	10 (Pf100)	10 (Pf100)	8 (Pf80) Cf 20	-	-	-	-	62 (Pf90) Cf 10	30 ad 70	23 (Pf100)	17 (Pf100)	18 (Pf100)	20 (Pf100)	28 (Pf100)	60 (ad100)	40 (ad100)	Cf 40 ad 60	65 ad 60	40 (ad100)	30 (ad100)	Cf 60 ad 40	65 ad 40	40 (ad100)	30 (ad100)	53 (Cf100)		
C 漆料 期間 塗料	40 (Pf 20) ad 80	10 (Pf 5) ad 85	5 (Pf 5) ad 85	5 (Pf 10) ad 85	10 (Pf 10) ad 85	10 (Pf 10) ad 85	-	15 (Pf100)	12 (Pf100)	15 (Pf100)	35 (Cf100)							56 (ad100)												
	39 (ad100)	10 (ad85)	5 (ad85)	5 (ad85)	5 (ad85)	5 (ad85)	-	15 (Pf100)	12 (Pf100)	15 (Pf100)	40 (Cf10) ad 90	38 ad 70	10 (Cf10) ad 90	25 (Cf70) Pf 30	38 (Pf60) Cf 40	60 (Pf15) ad 85	53 (ad100)	53 (ad100)	Pf 15 ad 85	45 ad 85	56 (ad100)									

(1) 付着力 : kgf/cm², () 内は破断形態 その面積 (%)

(2) 破断形態の略号

ad : 接着剤はがれ

Cf : 漆膜の凝集破断

Pf : 着地からの破断

(3) Pf の着地からはれでは素地面上に黒さびが確認できる

(4) 試験板はネット、シート等の養生なしのものを用いた

表 4.8.3(3) 没水部の付着力試験結果(対象:さび面)

		水 中 清 掃					
		0	0	24	0	6	24
初期		12箇月後			24箇月後		
A	20(cf100)	自然	自然	—	—	—	
	22(cf100)	はく離	はく離	—	—	—	
B	28(pf 15) cf 85) 35(pf 15) cf 85)	※ 10(pf100)	※ 10(pf100)	※ 10(pf100)	※ 3(pf100)	※ 5(pf100)	
C	25(pf 60) cf 40) 25(pf100)	10(pf100)	10(pf100)	5(pf100)	10(pf100)	※ 10(pf100)	

- (注) (1) ※:水が素地面に確認できる。
 (2) 試験板はネット、シート等の養生なしのものを用いた。
 (3) 付着力: kgf/cm², () 内は破断形態とその面積(%)。

(4) 破断形態の略号 {
 ad :接着剤はがれ
 cf :塗膜の凝集破断
 pf :素地からのはがれ

表 4.8.3(4) 沈水部の付着力試験結果（対象：日塗膜）

処理 時間 (h)	塗料 仕様	A			B			C		
		12箇月後	24箇月後	12箇月後	24箇月後	12箇月後	24箇月後	12箇月後	24箇月後	12箇月後
#6.1	0 18(ad100)	28(AC100)	30(ad100)	28(AC100)	50(Cf6.0)	50(AC Cf4.0)	50(Pf95)	15(AC5)	15(Pf95)	15(Pf95)
	24 28(ad100)	22(Pf95)	15(Pf40)	15(ad60)	10(Cf30)	10(Pf70)	10(Pf100)	12(Pf100)	12(Pf100)	12(Pf100)
#6.2	0 自然はく離	—	18(Pf40)	18(ad60)	20(AC50)	32(Pf60)	32(ad40)	18(Pf100)	18(Pf100)	18(Pf100)
	24 10(Pf100)	自然はく離	※1) 5(Pf100)	12(Pf100)	32(IzCf5)	32(Cf6.5.Pf3.0)	28(Pf100)	28(Pf100)	28(Pf100)	28(Pf100)
#6.3	0 20(ad100)	31(Cf100)	20(Cf5)	20(ad95)	42(Cf100)	20(Pf60)	20(ad40)	22(Pf100)	22(Pf100)	22(Pf100)
	24 18(ad100)	5(Pf100)	10(Cf40)	10(ad60)	18(Cf60)	18(Pf40)	20(ad100)	35(Pf100)	35(Pf100)	35(Pf100)
#6.4	0 18(ad100)	42(Cf90)	33(Pf80)	33(ad20)	21(Pf100)	30(ad100)	30(ad100)	22(Pf100)	22(Pf100)	22(Pf100)
	24 ※2) 6(Pf100)	自然はく離	※2) 3(Pf100)	※1) 3(Pf100)	10(Pf100)	27(Pf20)	27(Cf8.0)	15(Pf100)	15(Pf100)	15(Pf100)
#6.5	0 18(AC3.0 Cf2.0, ad5.0)	22(AC100)	21(AC7.0)	21(ad3.0)	15(AC100)	18(AC6.0)	18(ad4.0)	15(AC100)	15(AC100)	15(AC100)
	24 18(AC100)	25(AC5.0 Cf5.0)	20(Cf7.0)	20(ad3.0)	15(Cf9.0)	22(Cf4.5)	22(Cf4.5)	20(AC100)	20(AC100)	20(AC100)
#6.6	0 28(ad100)	23(Pf100)	24(Cf7.0)	24(ad3.0)	23(Pf100)	21(Pf7.0)	21(ad3.0)	16(Pf100)	16(Pf100)	16(Pf100)
	24 自然はく離	—	※1) 2(Pf100)	※1) 3(Pf100)	自然はく離	—	—	—	—	—
#6.7	0 39(ad100)	26(Cf8.5 Pf1.5)	20(ad100)	55(Cf100)	42(ad100)	42(ad100)	56(Cf5.0)	56(Cf5.0)	56(Cf5.0)	56(Cf5.0)
	24 ※2) 6(Pf100)	26(Pf100)	21(Cf1.0 Pf3.0, ad6.0)	20(Cf3.0)	29(Pf7.0)	29(ad1.0)	32(Pf100)	32(Pf100)	32(Pf100)	32(Pf100)
#6.8	0 31(Cf8.0 Cf3.0, ad5.0)	20(Cf100)	10(Cf8.0, Cf100)	10(Cf8.0, Cf100)	18(Cf7.5)	18(ad2.5)	20(Cf100)	20(Cf100)	20(Cf100)	20(Cf100)
	24 ※2) 6(Pf100)	10(Cf4.0)	8(Cf6.0)	11(Cf100)	15(Cf8.0, Cf100)	15(Cf100)	12(Cf8.0, Cf1.5)	12(Cf8.0, Cf1.5)	12(Cf8.0, Cf1.5)	12(Cf8.0, Cf1.5)

鉛 () 内 破断形態とその面積 (%)

(1) 付着力: kgf/cm²

(2) 破断形態の略号:

(3) ※1) 屋間に水が確認できる

(4) ※2) 塗膜はく離気味

ad : 接着剤はがれ

Cf : 塗膜の凝集破断

Pf : 素地からののはがれ(旧塗膜)

AC : 旧塗膜の下又は中塗りの塗膜凝集破断

(c) 耐電気防食性

水中硬化型塗料 3 種の耐電気防食性は図 4.8.1 に示す方法で、海水浸漬を実施した。経時の外観調査結果を表 4.8.4 に示す。

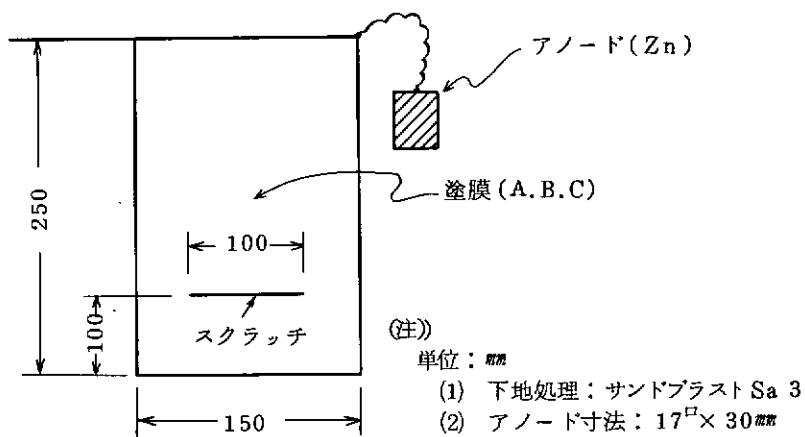


図 4.8.1 耐電気防食性試験

表 4.8.4(1) 耐電気防食性試験(12箇月後)

塗料	個所	一般部	スクラッチ部
A		○	○ (デポジット付着)
B		○	"
C		○	ふくれNo 2 F

(注) (1) 評価○: 異常なし

ふくれ: ASTM D714-56による

表 4.8.4(2) 耐電気防食性試験(24箇月後)

塗料	個所	一般部	スクラッチ部
A		○	○
B		ふくれNo 4 F	○
C		○	ふくれNo 2 F

4.9 水中補修材料の長期防食性試験

海洋構造物メインテナンス用として各種水中補修材料の過酷な条件下における耐食、耐久性を調査するため、 $300 \phi \times 3.5 m$ で中央部付近に溶接ビードを設けた鋼管試験体（表面状態：プラスト処理）を S 5.8 年 5 月に海浜干満帯へ設置した。4 箇月放置後、各種水中補修材料を用いて、防食施工した。これら鋼管試験体の 12 箇月経過後の調査結果を表 4.9.1 に示す。

表 4.9.1 水中補修材料の調査結果(12箇月後)

材 料 性	外 観	* 打診検査	そ の 他	備 考
水中硬化型塗料 A	チェックング 数箇所	○	「F」と併用 干溝部～飛沫部 ($h = 0 \sim 1.6 \text{ mm}$ 位)	ウェットハンド による塗装
B	点さび 5ヶ (塗り残し部)	"		ヘラ塗り
C	○	"		"
D	クラック 5 cm長 1ヶ	"	鋼管 1本を D と E で半面づつ塗装	"
E	クラック 7 cm長 1ヶ (Dとの塗り重ね部)	"	分割：縦 $\frac{1}{2}$ 分割	"
F	○	"	「A」と併用 飛沫部のみ	"
防食テープ FRP カバー方式	○	-		ペースト テープ巻き } 手作業 カバー取付 }
T E	干溝部 点さび 0.1 %	"	プランク的意図 (比較用)	エアレス塗装

(注) (1) *打診検査：1ボンドハンマにて打撃し、発生する音色からはく離等を判別した。

(2) 評 価 ○：異常なし

(3) 水中硬化塗料 A～F の性状については表 4.2.3 及び表 4.2.5 を参照。

4.10 水中機器によるメンテナンス実験

浮体構造試験体の没水部を利用した水中機器によるメンテナンス実験を本年度実施した。実験に用いた機器(水中TVカメラ、陸上モニタTV、ビデオデッキ、水中カメラ、水中電話、水中清掃機、水中板厚計)を、表 4.10.1 及び図 4.10.1 に示す。

実施内容は次のようなである。

① 清掃前の

水中検査： 陸上モニタによる生物付着状況。

塗膜欠陥の有無。

② 水中清掃： (浮体構造物没水部の)付着生物の除去。

水中塗装前下地処理。

③ 清掃後の

水中検査： 陸上モニタTVによる生物除去状態。

塗膜欠陥の有無。

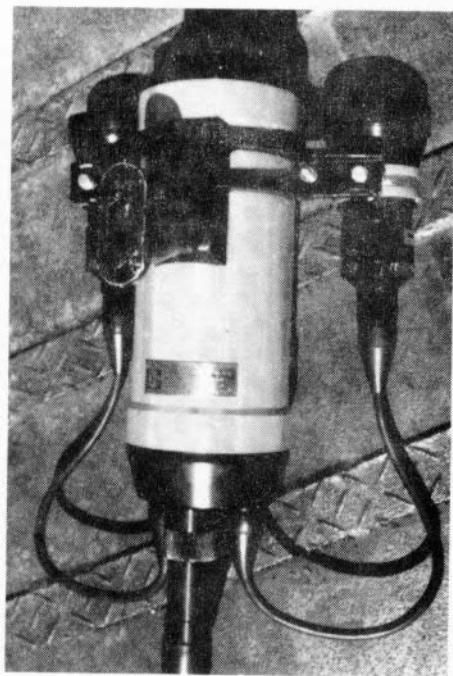
④ 板厚測定： 水中板厚計による塗膜はく落部(鉄素地露出)の板厚測定。

⑤ 水中塗装： 塗膜はく落部の補修塗装。

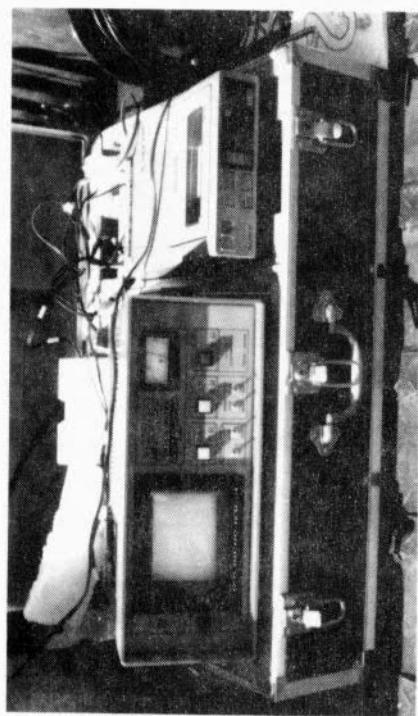
これら①～⑤については、その模様をすべてビデオ収録した。尚、①～③及び⑤の詳細については 4.4 項に述べた。従って水中板厚計による防食仕様 No.8、ES(FRP)の水中補修塗膜はく落部の板厚計測結果を表 4.10.2 に示す。

表 4.10.1 水中メインテナンス実験使用機器

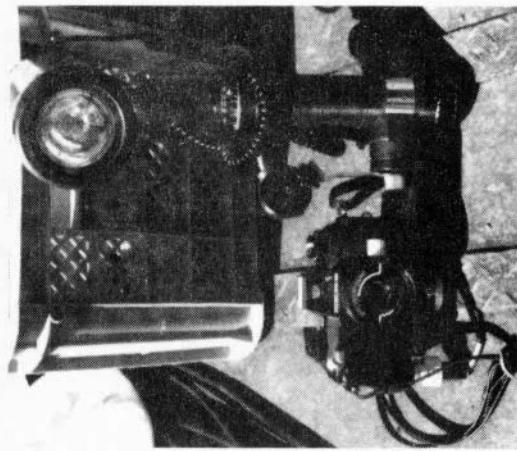
種類	名 称
水中モニタ システム	UNDER WATAR COLOR TV SYSTEM MC-108VF (水中TV カメラ, 地上モニタTV, ビデオデッキ, 水中ライト)
水中電話	AQUA・PHONE
水中カメラ	NIKONOS N-A
水中清掃機	ELE・MUC
水中板厚計	ULTRASONIC UNDER WATER THICKNESS METER "DUM"



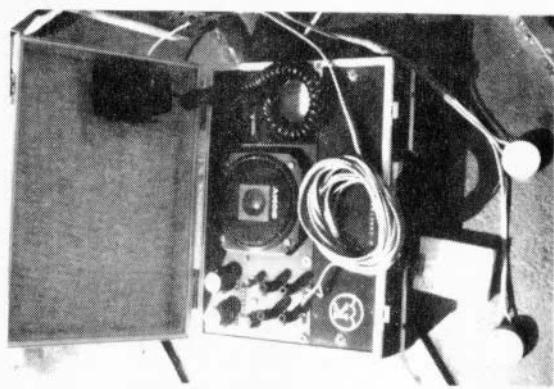
(1) 水中カラ－TVカメラ



(2) 地上モニタリングシステム



(3) 水中カメラ



(4) 水中電話



(5) 水中板厚計

(6) 水中清掃機は図4.4.1に示した。

図4.10.1 水中メインナンス実験使用機器

表4.10.2 水中板厚計による板厚測定結果

元 厚	測 定 結 果				水 中 板 厚 計		
	No.8でのダメージ部 (20~30cm ²)	ES(FRP)でのダメージ部 〔水中補修部の全周〕			型 式:WELLS-KRAUTKRAMER	DUM	LTD
SGP	7.9	7.9	7.6	7.5	7.6	測定方式:超音波	
-500A	7.7	7.6	7.4	7.6	7.9	測定能力: 4~100 mm steel	
7.9mm	7.9	7.7	7.6	7.6	7.8	測定誤差: ± 0.2 mm	
	AV 7.8	AV 7.7	7.5	7.6	7.8	許容範囲: 4 mm厚, 半径20 mm以上の 鋼管で測定可能	

(注) ダメージ部: 6箇月間無塗装状態で海水中に放置され、水中補修塗装部1箇年経過。水中清掃により水中補修塗膜のはく離を生じた時点での測定。

4.1.1 調査・試験結果について

(1) 浮体構造物

(a) 外観、付着生物及び生物除去

昭和55年9月の実海域設置から4箇年を経過したが、ライニング系防食仕様4種〔仕様No.6~8, ES(FRP)〕は、洋上大気暴露部での変色又は、チョーキングが認められる程度である。没水部塗膜は昭和56年10月、58年10月及び59年9月に水中清掃を実施すると共に、生物付着の影響を調査した。

生物付着量は水深1m付近において、大略1m²当たり2~3kgであり防食仕様種及び南面と北面による差異は顕著でない。但し付着した生物種は位置によって異なっている。

生物付着量の経時変化は、1年放置と2年放置等で求めたが、没水年数が多いほど付着量が比例的に増加する傾向はなく、放置した年度によって増減しており、生物が棲息するための海洋環境の影響が大きいと判断される。

付着生物の除去は、水中清掃機を用いて実施したが3回の水中清掃共にその難易性に差異はほとんどなかった。これは生物付着量がいずれも同程度であったためと思われる。

清掃後の塗膜状態は、没水年数が増加するにつれて防食仕様No.6で黒変、No.7及び8で茶~黒色のしみが多く認められた。

付着生物のうち、塗膜に最も悪影響を与えるふじつぼに関しては、いずれの防食仕様共に塗膜内への喰い込みはなく、その除去時にも塗膜のはく離を伴うことも認められなかった。

(b) 水中補修

浮体構造物没水部の塗膜を一部鉄素地が露出するように強制はく離させ、昭和58年4月~10月の6箇月間実海域に放置したのち水中補修塗装を行った。この強制はく離後の素地観察でES(FRP)は一部に点さびが認められ、この部分は没水30箇月で腐食因子が浸透していると判断された。

昭和58年度の水中補修塗装は、ダメージ部を水中清掃機により金属光沢面となるよう下地処理し、水中硬化型塗装「A」~「D」4種で実施した。

その結果、塗装「A」はごく一部の補修ができたのみであり、塗装「C」は水中塗装ができず大気中でウェット塗装とした。水中塗装でダメージ部を補修できたのは、塗装「B」及び「D」の2種であった。

水中又は気中ウェットで塗布したそれらの塗膜は、本年度の揚陸調査において塗料「D」で一部はく離が確認された。揚陸調査後、この部分の水中清掃を実施したが、塗料「D」はこの作業ですべてはく離した。他の塗膜にははく離は生じなかった。

塗料「D」がはく落した部分の補修は、前年度と全く同様の下地処理後、塗料「E」を用いてダイバーによるペラ塗りとした。

塗料「E」の初期付着は良好であり、 0.4 m^2 を25分で塗布した。塗布14日後の硬化調査において塗膜は鉛筆硬度F程度であった。

これらのデータから比較的大面積の水中補修塗装は、塗料が被塗面になじみ易く、かつその部分の水排除性を有すること、即ち初期付着性が良好であることが第1条件となり、更に硬化後、素地との付着性を如何に維持させるかが重要であることを確認した。

(2) 上部構造物

昭和56年度に追加設置した上部構造部(防食仕様No.1～8)は、洋上大気暴露雰囲気で42箇月経過している。現時点においては変色又はチョーキングが認められる程度で防食仕様8種に顕著な差異はない。但し防食仕様No.8のみ塗装困難箇所で18箇月経過後から点さびが認められるが、大きな進展はない。

本年度は、構造物に適用した防食仕様8種の表層が劣化したとの想定で一部塗り替えを実施した。塗り替えは下地処理をパワーツール研磨とし、7種の塗り替え仕様を適用したが、その初期層間付着性に全く問題は認められなかった。

(3) 水中補修試験板

昭和56年度に無塗装ゾーンを設定した防食仕様No.1～8の試験板は、実海域へ12箇月浸漬したのち水中清掃と水中塗装により補修し、各年度毎に経時の生物付着量及び生物の塗膜劣化への影響を調査した。

試験板に付着した生物除去は、皮スキ用いて実施したが、補修後24箇月までは、補修部の塗膜に海水の浸入や層間はく離は認められなかった。

本年度36箇月経過後の状態を調査したが、防食仕様No.2, 3に適用した塗料「A」での補修部ではなく離が認められた。しかし、他の試験板では補修部の異常は認められなかった。

これらの試験板への生物付着はこけむし、ほや、ふじつぼが主体であり、付着量は 1 m^2 当たり $2 \sim 3 \text{ kg}$ 前後である。本年度調査データで 1 m^2 当たり 10 kg 前後のものもあるが、これは小面積から 1 m^2 換算しているための誤差である。(対象部にアラメ付着があったため)

(4) 洋上大気暴露試験板

昭和56年度、上部構造物の増設と同時に設置した防食仕様No.1～8の試験板は、当該雰囲気で42箇月経過している。現時点における各防食仕様の状態は次の様である。

(a) 外観

変色又はチョーキングは認められるが、さび、われ、ふくれ等の塗膜欠陥発生はない。

(b) 付着力

初期と同様の付着強度並びに破断形態を示し、特に経時変化は認められない。

(c) 無塗装ゾーンのさびの進行

無塗装ゾーンは全面褐色のさびに覆われているが、塗膜との境界部でのふくれ、はく離等は認められない。

(d) インピーダンス

各発振周波数における抵抗値と容量値に異常は認められず初期から42箇月経過後において経時変化も認め難い。

経時の $\tan \delta$ 値は若干のばらつきがあるものの、特に異常な値を示すものはない。

(e) 無塗装ゾーン補修試験板

防食仕様No.1～8塗膜の無塗装ゾーンは12箇月暴露したのちパワーツール又はサンドブラスト処理し、7種の補修仕様で補修した。この試験板は暴露雰囲気で30箇月経過しており、これらの補修部のインピーダンスは、各発振周波数における抵抗値、容量値共に、下地処理差による差異はなく、経時変化も認められない。経時の $\tan \delta$ 値も同様である。補修部塗膜の外観は、チョーキングが認められる程

度で他の欠陥発生はない。

(5) 水中硬化型塗料によるメインテナンスの検討

昭和57年度、水中硬化型塗料「A」、「B」、「C」3種を用いて飛沫部、干満部及び没水部に設置した試験板を補修塗装したが、24箇月経過後の状態は次の様である。

(a) 外観

(i) 飛沫部：さび面を対象とした補修試験板すべてにおいて、さび、ふくれ、われ等の欠陥は認められない。

旧塗膜を対象とした場合、24箇月経過後、防食仕様No.8に適用した塗料「B」でわざかのはく離が認められた。

(ii) 干満部：さび面を対象とした補修試験板すべてにおいて、12箇月経過後までは、さび、ふくれ等の欠陥は認められなかった。

24箇月経過後においては、塗装から没水までのインターバルにかかわらず手工具処理での塗膜はく離が3塗料中2塗料で認められた。

(iii) 没水部：水中清掃から水中塗装までのインターバルや養生方法にかかわらず塗料「A」で補修(対象：さび面)した試験板に塗膜全面はく離が12箇月経過後から認められた。

塗料「B」、「C」で補修した試験板では、養生にシートを用いた系で塗膜のごく一部に12箇月経過後、はく離が認められた。

24箇月経過後の調査では、その進展はなく、他の試験板についても欠陥発生は認められない。

ネットにて養生した試験板は、いずれも塗膜上に付着したふじつぼが成長し、ネットを押し上げており、ネットは塗膜中へ埋没させる塗装方法が望ましいと判断される。

(iv) 没水部：12箇月経過後においては、塗料「A」を用いて防食仕様No.2.7を補修した系で全(対象：旧塗膜)面はく離、塗料「B」を用いて防食仕様No.2を補修した系でふくれが認められた程度で、全般的には3塗料共に外観は良好であった。

24箇月経過後においては、塗料「A」で防食仕様No.4を補修した系ではく離が認められ、塗料「B」では補修したほとんどの系でふくれ、はく離が認められた。

塗料「C」で補修した系では、ふくれ、はく離等の欠陥発生は認められなかった。

塗料「C」で防食仕様No.6を補修した系で全面はく離が認められたが、これは初期時点から付着不良であったためである。

(b) 付着力試験

(i) 飛沫部：3塗料共にパワーツール又はブラスト処理では24箇月経過後においても初期と同等(対象：さび面)の良好な付着力を示した。しかし、低級下地処理の手工具処理においては、塗料「A」、「C」は12箇月経過後で5～16kgf/cm²、24箇月経過後で5～10kgf/cm²と付着力が低下しており、塗料「B」は、前者ほどの付着力低下はないが、24箇月経過後では素地から30kgf/cm²ではなく離した。

(ii) 干満部：3塗料共にブラスト処理では24箇月経過後も初期と同等の良好な付着力を示した。

(対象：さび面)パワーツール処理では、初期に比べ付着力の低下が認められ、やや素地からはがれ易い傾向がある。

手工具処理では、12箇月経過後から付着力の低下が顕著であり、24箇月経過後ににおいて2塗料で自然はく離が生じたほか、測定した破断箇所はすべて素地(黒さび)からであり、その付着力も5～15kgf/cm²と低い3塗料の塗装からインターバルの影響は各下地処理においてほとんど認められない。

(iii) 没水部：3塗料中、「A」は12箇月経過後において全面はく離を生じ付着力試験は不可能で(対象：さび面)あった。

塗料「B」、「C」は、12箇月及び24箇月経過後、共に $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下の付着力で素地からの破断形態を示した。しかし破断面には著しいさびは発生していなかった。その破断面に水の存在が確認されたものがあるが、この水は、塗装時に存在したものでなく塗膜又は試験板エッジ部から浸透したものと思われる。いずれにしても水の存在が確認された塗膜は、ややはく離気味といえる。

水中清掃（ケレン）から塗装までのインターバルの影響は3塗料共に認められない。

(iv) 没水部：3塗料共に水中清掃から塗装までのインターバルなし（0）が24時間に比べ、全般（対象：旧塗膜）的に良好な傾向を示した。

24時間後に塗装した塗膜はインターバルなし（0）に比べ付着力が低いか又は層間からはがれ易い傾向がある。

浸漬期間12箇月と24箇月での付着力は、大差ないが、破断形態において24箇月経過後で層間はく離するものが多くなっている。

旧塗膜8種のうち特異な例は、防食仕様No.5と8であり、いずれの組み合せにおいても他の系では発生しなかった旧塗膜内部破断の形態を示し、表層付近が破断し易い傾向であった。

(c) 衝撃試験（ハンマテスト）

12箇月及び24箇月経過後において飛沫部、干満部、没水部（対象：さび面）の補修試験板について、2ポンド片手ハンマによる衝撃試験を実施したが、3塗料共に異常は認められなかった。（但し、自然はく離を生じた塗膜は除外）

同様に浮体構造物（防食仕様4種）の飛沫部に塗布した3塗料についても異常は認められなかった。

(d) 耐電気防食性

3塗料中、塗料「C」のスクラッチ部周辺にふくれの発生が、12箇月経過後から認められ24箇月経過後では、その進展はない。

他の2塗料は、12箇月経過後において全く異常は認められなかったが、24箇月経過後において塗料「B」の一般部にわずかのふくれが認められた。

(6) 水中補修材料の長期防食性試験

海浜干満帯へ設置した無塗装の鋼管杭（ $300\text{Ø} \times 3.5\text{m}$ ・6本）を対象に干潮時を利用した方法で補修を行った。補修材料は水中硬化型塗料6種、FRPカバー方式1種と汎用のタールエポキシ系塗料1種である。

12箇月経過後の状態は、塗料「A」で表層にチェックング、タールエポキシで点々とさびが発生しており、材料種によっては欠陥を発生しつつあるものが見受けられる。

更に、鋼管杭を設置した海浜独特の影響として、打ち寄せる波浪によって砂礫が移動するため補修した塗装膜等が減耗しつつある。

特に、タールエポキシ塗膜では減耗と機械的ダメージによる発さびが始まっている。

(7) 水中機器によるメインテナンス実験

(a) 水中観察（陸上モニタTVによる）

生物が付着したままでは塗膜の検査はできないが、生物種、付着量等は判別可能であった。水中清掃後の塗膜状態は陸上観察と同程度に検査できるが、水中TVカメラの近接に限界があるため、微小のふくれ、さび等の判別は不可能に近い。但し調査対象物の色調によってはさびの判別はできる、例えば塗膜が白、グレー等で赤さび発生の様にコントラストが明確であれば直径 1mm 程度まで判別できる。

水中観察で重要な事柄は、海水の濁りであり、実験時においても瀬戸内海独特の海中浮遊物があり、画像は鮮明でなかった。

陸上に設置したモニタTVに関しては、周囲が暗くて直反射光等のない場所が最適であった。

(b) 水中清掃

水中構造物の塗膜検査のためには、まず生物除去が必要となる。水中清掃は資料No.341で示したように様々な方法があるが、清掃機は、ダイバー操作式で鋼管(500φ)に適用でき、かつ清掃効率に優れるものを選定した。

浮体構造物の水中清掃は昭和56年と58年にエヤー駆動方式の清掃機で実施したが、本年度は、漏電等の安全対策が充分なされているAC100Vで駆動可能な電動式を用いた。

清掃機に取付けるブラシ類は、両者同一である。

生物除去は強固に付着した生物をコーン型カッターで荒落したのち、ビニール被覆ワイヤブラシ付ディスクにて入念に仕上げた。コーン型カッターは鋼製であるため、凹凸の著しい塗膜や、刃先を当てる角度をミスした場合、塗膜表層が若干はがれる傾向が認められた。ビニール被覆ワイヤブラシに関しては、塗膜はく離等への影響は認められなかった。

(c) 水中板厚測定

水中検査の一貫として浮体構造物の塗膜はく落部の鋼板の厚さを超音波式水中板厚計で測定した。測定は水中にてダイバーが計器に表示されたデジタル発光式の数値を読み取り、水中電話にて陸上へ報告する方式で実施した。本計器による計測は、陸上での計測とほとんど変わらない簡便さ、精度でできることが確認された。計測結果に関しては元厚7.9mmが若干減耗したデータとなっている。

しかし、①元厚7.9mmにblastを行っていること、②防食塗膜強制はく離後、サンディングを行っていること、③鉄素地露出状態で6箇月間、海水中に放置されていること、等から妥当な値と思われる。

4.1.2 メインテナス方法に関するまとめ

(1) 防食仕様

実構造物に適用される防食仕様はメインテナスフリーが最も好ましい。

しかし、本研究で取り上げた8種の仕様の耐用年数はメインテナスフリーに近いと思われるが明確でない。

そのため、試験体としての浮体構造物や上部構造物に防食仕様を適用し、その防食性を実海域(東経133°57'、北緯34°30' 宇野港近傍)で約4箇年調査したが、特に問題となるような塗膜欠陥は認められなかつた。

(2) 水中メインテナス

(a) 浮体構造物 [防食仕様No.6~8及びES(FRP)]

実海域設置から4箇年経過後において、塗膜劣化に対する生物付着の影響は認められない。

没水部塗膜の生物付着量は、1年放置と2年放置において放置年数と生物付着量に比例関係は認められない。

生物付着量は放置年数の影響もあるが、調査年度によって出現生物が異なるように、生物が棲息するための自然環境の影響が大きいといえる。

生物除去のため、水中清掃は3回/4年実施したが、その難易性は生物付着量がいずれも同程度であったため大差なかった。しかし、没水年数が増加するにつれて塗膜にしみや黒変が認められた。

(b) 水中補修試験板

防食仕様No.1~8の無塗装ゾーンを水中硬化型塗料3種にて補修した試験板は、浸漬36箇月経過後の調査において一部の試験板ではく離が認められた。

3塗料は、全般的には良好な防食性を示しており試験板サイズの小面積補修では、実用上支障はないとの判断される。

(c) 浮体構造物ダメージ部の水中補修

浮体構造物の防食塗膜を強制はく離させたのち6箇月間実海水中で放置した。その部分は、付着生物

やさびで覆れており、これを水中清掃（ケレン）したのち水中硬化型塗料4種にて補修を行ったが、4塗料中2塗料は水中補修塗装不可能であった。

補修可能であった2塗料のうち1塗料は、1箇年後の水中清掃により全面はく離したが、1塗料ははく離することなく防食機能を発揮している。

1箇年後はく離した部分については、別の水中硬化型塗料にて再補修した。

浮体構造物のダメージ部面積は0.4～0.5m²であるが、前項に記した無塗装ゾーン試験板に比べ大面積である。大面積を補修するにあたっては、被塗面の処理、塗料の混合量、供給方法並びに塗布方法が問題となり、如何に最適条件で補修するかが、初期付着不良とか経年後の付着性に影響を与える。

現状の水中硬化型塗料は未完成部分もあるものの、水中塗装という条件からすれば、初期付着が良好で水中硬化すればその機能は発揮しているといえる。

塗装方法に関しては、大面積を対象とするのであれば機械化が切望される。

(d) 水中検査

水中TVカメラによる生物付着状況や塗膜状態の検査は、陸上モニタTVで充分に実施できる。但し、塗膜検査は付着した生物を水中清掃機のようなもので除去する必要はある。水中TVカメラは、ダイバー操作式と遠隔式があるが、深夜とか海象条件等で選択すればよい。更に、水中板厚測定に関しては、超音波板厚計を用いたが、その測定方法は非常に簡便で精度的にも全く問題は認められなかった。

(3) 洋上メインテナンス

洋上大気暴露した防食仕様No.1～8の無塗装ゾーンを一般的な補修前下地処理を行ったのち補修塗装（補修仕様7種）を実施した試験板は3～6箇月後において外観、インピーダンス共に異常は認められない。更に上部構造物の一部を用いて塗り替えを同様な方法で実施したが、その付着性に問題は認められない。従って、留意しなければならない事項はあるが、洋上大気暴露部でのメインテナンスは一般的な補修方法で可能といえる。

(4) 水中硬化型塗料による補修

重防食仕様の海洋構造物であっても何らかの補修を要する場合を考えられ、その補修を水中硬化型塗料で施工する際の様々な要因に対する検討を行い次の事項が判明した。

(a) 飛沫部、干溝部（対象：さび面）

補修塗装前の下地処理として、さび残存度の高い手工具処理に比べ、パワーツール又はプラスト処理が2～4箇月後においても付着性良好である。パワーツールとプラスト処理の比較では、付着力に大差はないが、パワーツール処理は、やや素地からはがれ易い傾向がある。

(b) 没水部（対象：さび面）

水中清掃から塗装までのインターバルにかかわらず3塗料中1塗料に全面自然はく離が認められた。他の2塗料ははく離を生じてないが、付着力は初期の1/2程度である。

養生方法でネットを用いた系では、ネットと塗膜間のふじつぼが成長しネットを押し上げており、養生時ネットは塗膜中へ埋没させるか塗膜硬化後撤去できるようにすべきである。

シートによる養生では、塗膜硬化前にシートと塗膜間の水が抜けにくく、完全塗膜は凹凸となり易い。但しシートは、塗膜が硬化すれば撤去可能である。

(c) 没水部（対象：旧塗膜）

防食仕様No.1～8塗膜の水中清掃から塗装までのインターバル2～4時間は、3塗料共に付着不良を示し、インターバルなし（0）、即ち清掃直後に塗布した系が良好である。

旧塗膜を水中清掃直後に補修塗装した系は、前記の鉄素地面より強大な付着力を維持しており、水中硬化型塗料での補修は、防食塗膜が完全に劣化した時点で行うより、健全塗膜が残存している時点で実施すべきであると思われる。

(d) 耐衝撃性

飛沫部から干溝部を対象として補修塗装した試験板において、3塗料共に直接衝撃による塗膜はく離は認められず特に問題はない。

(e) 耐電気防食性

3塗料中、エポキシ／ポリエステル樹脂の併用タイプは、スクラッチ部にふくれを発生しており、エポキシ系の2塗料に比べ、やや耐電気防食性が劣っている。

(5) 水中補修材料の長期防食性

海浜干溝帯に設置した無塗装鋼管杭を対象に、水中硬化型塗料、FRPカバー方式、及びTE塗料による補修を実施した。補修方法は干溝時間を利用した気中施工とした。

昭和58年度は、これら材料の施工性を把握したが、各種の水中硬化型塗料は、塗料混合やその塗装作業性に困難さがあり、機械化が切望される。

FRPカバー方式ではボルト・ナット締結にやや困難さがあるものの外観は最も優れている。

TE塗料はこの様な条件下で最も多く用いられておりプランク的意図で適用した。

各材料共に施工後、没水までのインターバルは2～5時間と比較的長時間であり、波浪等による塗膜ダメージや流失は認められなかった。

12箇月経過後における補修材料の防食性に大差はないが、TE塗膜では機械的摩耗作用による発さび他の2塗料でもわれやチエッキングが発生し差異があらわれつつある。

本実験の様な条件下では、その施工性からTE塗料の適用が最も一般的であるが、水中硬化型塗料であってもその施工性さえ改良されれば、充分適用可能である。FRPカバー方式については、数多くの実績もあり、特に問題はない。

参考資料

研究資料 №341 日本造船研究協会 S R 1 8 2 部会、昭和55年度報告書

"	№347	"	"	56	"
"	№357	"	"	57	"
"	№369	"	"	58	"

5. 防食施工法の調査検討

5.1 調査検討の目的と検討内容

厚膜被覆材であるライニング材料は海洋構造物の長期防食用として注目されており、種類によってはすでにかなりの適用実績を有するものもある。しかし、一般には、ライニング材を適用する場合、高グレードの前処理が要求されたり、被覆施工時における環境条件（温度・湿度条件）や塗り重ね間隔（インターバル）などに制約があるなど、造船所において実績の多い一般塗料の塗装施工とかなり異なる場合が多い。そこで、本章ではライニング材料を対象に、その被覆施工上の問題点を明らかにすることを目的として調査検討したものであり、各種の施工条件とライニング皮膜の性能特性との関係について、56年度から4箇年にわたって実施してきた。

主な検討項目とその内容概要は以下のとおりである。

(1) ライニング施工におけるショッププライミング方式の適用性（56～57年度実施）

造船所における現在の建造システムでは、ライニング施工の前処理として、全面プラスチック処理が可能であるとは限らない。従って、現在一般化しているショッププライミング方式がライニング施工に適合するか否かについて、技術的に明らかにするため実施したものであり、現用の各種ショッププライマ（S/P）及び2次表面処理法とそのグレードに対するライニング材料の適用性について特に層間付着性の観点から検討した。（研究資料No.347号及びNo.357号を参照）

(2) ライニング材料の付着性に及ぼす素地調査法の影響（56～57年度実施）

ショッププライマー塗膜がなく、さび鋼板に対する素地調整グレードがライニング材料の付着性に及ぼす影響について調査した。（研究資料No.347号及びNo.357号を参照）

(3) ライニング施工時の環境条件が皮膜硬化に及ぼす影響（57年度実施）

ライニング施工時の温度条件と皮膜硬化速度の関係及び温度条件と経時後の皮膜硬さの関係について調査した。（研究資料No.357号を参照）

(4) ライニングの塗り重ね間隔に関する検討（57年度実施）

同種ライニングの塗り重ね間隔及びライニング皮膜に機能塗装材料（各種樹脂塗料）を塗り重ねる場合のインターバルが層間付着性に及ぼす影響について調査した。（研究資料No.357号参照）

(5) ライニング材料の性状特性に関する検討（58年度実施）

一般に皮膜型の有機樹脂ライニング材料には液状樹脂が使用され、有機溶剤を極力少なくしたものが多い。従って、樹脂、顔料及び骨材などを配合する場合、それらの種類や量によって、ライニング材の性状や特性がかなり異なっている。特に施工性に大きく影響する粘度はライニング材によって大きく違っている。又、粘度は環境温度によって変動し、さらに反応硬化型のライニング材は混合後の粘性挙動も一様ではない。そこで、ライニング材料の混合時における温度条件と粘度の関係やシンナー希釈率と粘度の関係について調査した。（研究資料No.369号参照）

(6) ライニング施工条件に関する検討（58年度実施）

造船所などにおいては、現在、塗料の施工に汎用している塗装機を使用してライニング材の施工を行う場合が多い。その際の施工性についても十分に検討を加えておく必要があり、さらに施工性をよくするための多量のシンナー希釈はむしろライニング皮膜性能に悪影響を及ぼす恐れがあるため、シンナー希釈率と皮膜形成性などの関係を追究した。

そこで、汎用エアレス塗装機あるいは専用特殊塗装機を用いて、各種ライニング材の施工条件と膜厚分布やパターン幅の関係、さらに、シンナー希釈率の変化による施工性やタレ限界膜厚などについて検討した。（研究資料No.369号参照）

(7) ライニング皮膜への塗り重ね特性に関する検討（59年度実施）

前述した(4)ライニングの塗り重ね間隔に関する検討において、長期間の間隔をあけて上塗りする場合、

前処理を行わなければほとんどの試料で層間付着性に問題があった。そこで本項目ではこの層間付着性を向上させることを目的に、同種ライニング材を塗り重ねる場合と機能塗装材料を塗り重ねる場合のライニング皮膜の表面処理法について検討した。

(8) ライニング施工マニュアルの作成(59年度)

前述の(1)～(8)までの各種検討結果を各種ライニング材ごとに取りまとめ、ライニング施工マニュアルを作成した。

5.2 ライニング皮膜への塗り重ね特性に関する検討(59年度実施)

ライニング材の被覆施工において、ライニング材を塗装後、長期間塗装間隔をあけて同種ライニング材、あるいは機能塗装材料を塗り重ねると層間付着性に問題を生じる。

そこで、本項目はこの層間付着性の向上方法を対象に、塗り重ね時のライニング皮膜の表面処理と層間付着性との関係について調査した。

5.2.1 供試材料

(1) 供試ライニング材

供試ライニング材とその膜厚を表5.1に示す。

表5.1 供試ライニング材料とその膜厚

ライニング材料	略号	標準膜厚 [μm]		適用防食仕様
		wet	dry	
エポキシモルタルライニング	PEM	5,500	5,000	No.6
エポキシガラスフレークライニング	PEF	700	650	No.7
ポリエステルガラスフレークライニング	ESF	800	750	No.8
タールエポキシガラスフレークライニング	TEF	800	750	No.M2

(2) 供試機能塗装材料

ライニング皮膜面上に上塗りする機能塗装材料を表5.2に示す。

表5.2 供試機能塗装材料

機能塗装材料の一般名称	略号	標準膜厚 [μm]
エポキシ樹脂系外舷部上塗塗料	PE-T/S	40
ウレタン樹脂系外舷部上塗塗料	PU-T/S	40
ビニル樹脂系外舷部上塗塗料	V-T/S	20
塩化ゴム系船底防染塗料	CR-A/F	40

5.2.2 試験内容

- (1) 同種ライニング材の塗り重ね時の表面処理と付着性との関係。

サンドブラスト鋼板に供試ライニング材をスプレ方式で標準膜厚に塗装し、30日間屋外暴露後、各ライニング皮膜表面を表5.3に示す方法で処理した。その後、直ちに同種ライニング材を塗り重ね、14日間室内乾燥した。

表5.3 塗り重ね時のライニング皮膜表面処理

表面処理の種類	表面処理方法	表面処理の程度
A	無処理	(屋外暴露30日間後のままの状態)
B	シンナー拭き	ライニング材専用シンナーで表面を拭く。
C	サンドペーパーかけ	サンドペーパー#80で軽く皮膜表面を削る。
D	ディスクサンダーかけ	ディスクサンダー(ペーパー#16)で皮膜表面を削る。

この試験板を屋外暴露及び40°C加温塩水浸漬試験を行い、経時的に付着性を調べた。なお、付着性はJIS A 6909に準拠した引張付着力試験により実施した。又、この引張付着力試験における試験繰返しは3回行い、その平均値を皮膜破断強さとし、その皮膜破断形態は下記の3つに分類した。

- ① 層間破断以外の破断
- ② 1部層間破断
- ③ 100%層間破断

これらの破断形態の中で、本項目で特に問題になるのは②及び③である。

- (2) ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時のライニング皮膜表面処理と付着性との関係

前項と同じ表面処理を施した面に直ちに表5.2の機能塗装材料を標準膜厚に塗り重ね、14日間室内乾燥した。

この試験板を屋外暴露及び40°C加温塩水浸漬試験を行い、経時に付着性を調べた。付着性は前述、引張付着力試験と同じ方法で実施した。

5.2.3 試験結果と考察

同種ライニング材の塗り重ね時の表面処理と付着性との関係を調査した結果を図5.1に示す。又ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時のライニング皮膜表面処理と付着性との関係を図5.2~5.5に示す。(図5.1、図5.2~5.5)

これらの結果から、各防食仕様別にライニング皮膜表面処理と付着性との関係を考察すると以下の通りである。

- (1) 同種ライニング材の塗り重ね時の表面処理と付着性との関係

- (a) 防食仕様No.6(エポキシモルタルライニング:PEM)

各防食試験後の皮膜破断形態はいずれの表面処理においてもPEM皮膜の凝集破断であった。従って、皮膜破断強さも表面処理による差はなく、ほぼ同じであった。

のことから、試料PEMは屋外暴露1箇月以内であれば塗り重ね時の表面処理は無処理でも良好な層間付着性が得られると考えられる。

- (b) 防食仕様No.7(エポキシガラスフレークリайн:PEF)

40°C加温塩水浸漬3箇月後の表面処理A及びBの皮膜破断形態は100%層間破断であった。表面処理C及びDでは層間破断とPEF皮膜の凝集破断とが混在した状態であった。又、この時の皮膜破断強さはA及びBより高くなっている。

のことから、PEF皮膜の層間破断を完全になくすることは困難であるが、表面処理Cあるいは

Dを行うことで若干層間付着性が向上すると考えられる。

なお、屋外暴露板も40°C加温塩水浸漬3箇月後のものとほぼ同じ傾向であった。

(c) 防食仕様No.8(ポリエスチルガラスフレークライニング:ESF)

試験板作製初期の表面処理A及びBの皮膜破断形態は100%層間破断であったが、C及びDでは層間破断と凝集破断とが混在した状態となり、若干の付着性向上が認められた。このため、皮膜破断強さは表面処理C及びDはA及びBより高くなっている。

屋外暴露及び塩水浸漬3箇月後の皮膜破断形態はいずれの表面処理においてもESF皮膜の凝集破断であり、この時の皮膜破断強さは試験板作製初期と比べ、いずれも低くなっている。

これは、ESF皮膜の経時による皮膜凝集力の低下を示すものであり、ライニング材、ESFの皮膜劣化が問題である。

(d) 防食仕様No.M2(タールエポキシガラスフレークライニング:TEF)

各防食試験後の皮膜破断形態は表面処理A及びBでは100%層間破断であったが、Cは層間破断とTEF皮膜の凝集破断とが混在した状態であり、若干層間付着性向上が認められた。表面処理Dでは100%TEF皮膜の凝集破断であり、さらに付着性が向上した。皮膜破断強さにおいても表面処理C及びDはA及びBより高くなっている。

これらのことから、TEF皮膜の表面処理としてはDが最も好ましいと考えられる。

(2) ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時のライニング皮膜表面処理と付着性との関係

(a) 防食仕様No.6(PEM)と機能塗装材料を塗り重ねた場合

(i) PE・T/S 40°C加温塩水浸漬試験3箇月後の表面処理A及びBの皮膜破断形態は一部層間破断が認められた。しかし、C及びDでは100%PEF皮膜の凝集破断となり、この時の皮膜破断強さも向上している。このことからPE・T/Sの塗装前表面処理はCあるいはDが必要と思われる。

(ii) PU・T/S 屋外暴露3箇月後の表面処理C及びDの皮膜破断形態はPEM皮膜の凝集破断であり、皮膜破断強さも良好な値を示したが、40°C加温塩水浸漬3箇月後では1部層間破断を生じた。このため、PEMとPU・T/Sとの塗り重ねは浸漬環境下ではいずれの表面処理でも層間付着性に問題があると思われる。

(iii) V・T/S 各防食試験後の皮膜破断形態はいずれの表面処理においても1部層間破断が認められ、付着性に問題があった。又、各防食試験後の皮膜破断強さも表面処理に関係なく、ほぼ同じであった。

(iv) CR・A/F 各防食試験後の皮膜破断形態は表面処理DではCR・A/F皮膜の凝集破断となり、皮膜破断強さも高く、最も付着性が良好であった。

(b) 防食仕様No.7(P EF)と機能塗装材料を塗り重ねた場合

(i) PE・T/S, PU・T/S 40°C加温塩水浸漬3箇月後の皮膜破断形態は表面処理A及びBでは100%層間破断を生じたが、C及びDでは付着状態が良好となった。特にPU・T/Sの表面処理DではPU・T/S皮膜の凝集破断となり、付着性が向上した。

屋外暴露3箇月後の皮膜破断状態及び皮膜破断強さはいずれも良好であった。

(ii) V・T/S 防食試験後の皮膜破断形態はいずれも表面処理A、B及びCでは層間破断が認められたが、Dでは100%V・T/Sの凝集破断となり、皮膜破断強さも向上し、良好な付着性となつた。

(iii) CR・A/F 防食試験後の皮膜破断形態はいずれも表面処理A及びBでは100%層間破断であった。しかし、C及びDでは付着性の向上が認められ、特にDはCR・A/F皮膜の凝集破断となり、その皮膜破断強さは最も高かった。

(c) 防食仕様No.8(ESF)と機能塗装材料を塗り重ねた場合

(i) PE・T/S, PU・T/S, V・T/S 防食試験後の皮膜破断形態はいずれも表面処理A及びBでは100%層間破断であったが、表面処理Cでは1部層間破断状態、表面処理Dでは100%ESF皮膜の凝集破断となり、順次付着性が向上した。この傾向を皮膜破断強さからみると、PE・T/S, PU・T/Sの場合は表面処理による皮膜破断強さの差は殆んど認められなかつたが、V・T/Sの場合ではやや顕著にあらわれた。

(ii) CR・A/F 40°C加温塩水浸漬3箇月後の表面処理C及びDの皮膜破断形態は一部層間破断が認められたが、A及びBより付着性が向上した。屋外暴露3箇月後の表面処理C及びDの皮膜破断形態はCR・A/Fの凝集破断となり、良好な付着状態となつた。皮膜破断強さにおいても表面処理C及びDはA及びBより高くなっている。

(d) 防食仕様No.M2(TEF)と機能塗装材料を塗り重ねた場合

(i) PE・T/S, PU・T/S 防食試験後の表面処理A及びBの皮膜破断形態は100%層間破断であり、付着性が悪かった。しかし、表面処理C及びDでは付着性が向上し、特にDは100%TEF皮膜の凝集破断となり、最も良好な付着性であった。皮膜破断強さにおいても、表面処理Dは最も高い破断強さであった。

(ii) V・T/S, CR・A/F 表面処理A及びBの皮膜破断形態はいずれの防食試験後においても、100%層間破断であったが、C及びDでは一部層間破断状態となり、若干付着性が向上した。又皮膜破断強さも表面処理C及びDはA及びBより高くなっている。

(3) 塗り重ね特性に関するまとめ

同種ライニング材料及びライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね層間付着性をライニング皮膜の表面処理との関係で調査した。これらの屋外暴露又は40°C食塩水浸漬3箇月後の皮膜破断状況をまとめて表5.4及び表5.5に示す。

この結果、同種ライニング材及びライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時の表面処理は相対的にB(シンナー拭き)では効果がなく、C(サンドペーパーかけ)あるいはD(ディスクサンダーかけ)で付着性が向上する。しかし、屋外暴露環境下あるいは塩水浸漬環境下では100%層間破断をなくすることが困難な防食仕様もあり、この場合の防食施工にあたってはさらに調査検討が必要である。

(表5.4, 表5.5)

表5.4 同種ライニング材の塗り重ね時の
表面処理と皮膜破断形態

表面処理 ライニング	A	B	C	D	備考
PEM	○	○	○	○	※ ESF皮膜 の劣化が問題である。
PEF	×	×	×	×	
ESF	○*	○*	○*	○*	
TEF	×	×	×	○	

注(1)評価  : 層間破断以外の破断

 : 1部層間破断

 : 100%層間破断

(2) 皮膜破断形態は屋外暴露、塩水浸漬のうち、不良な方を載せた。

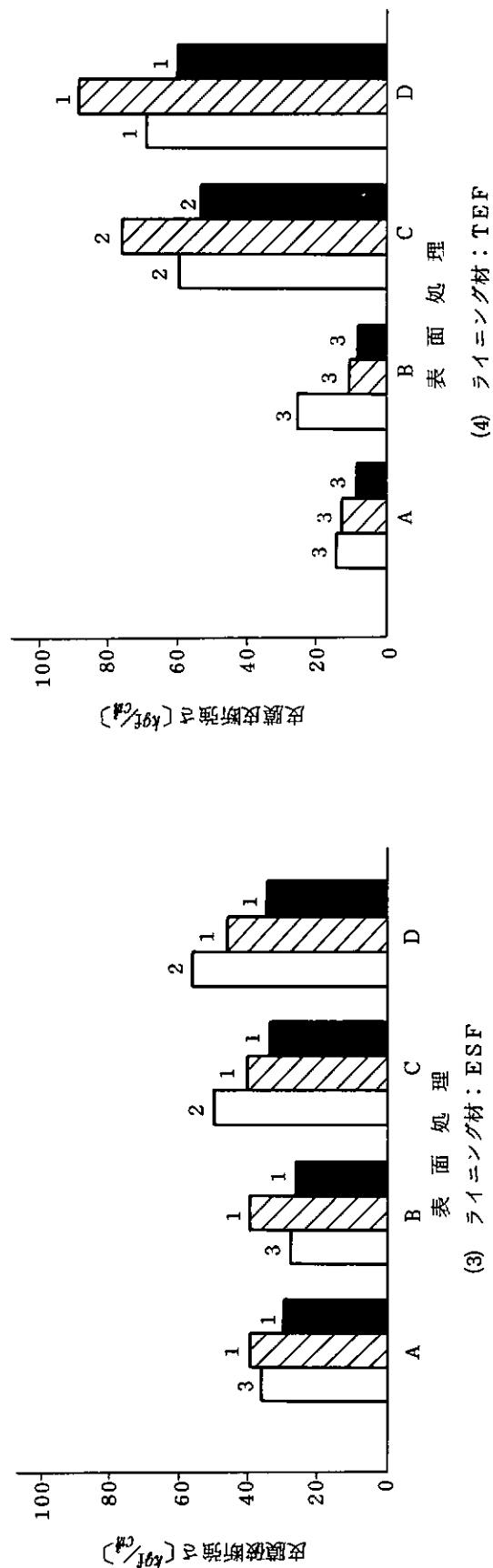
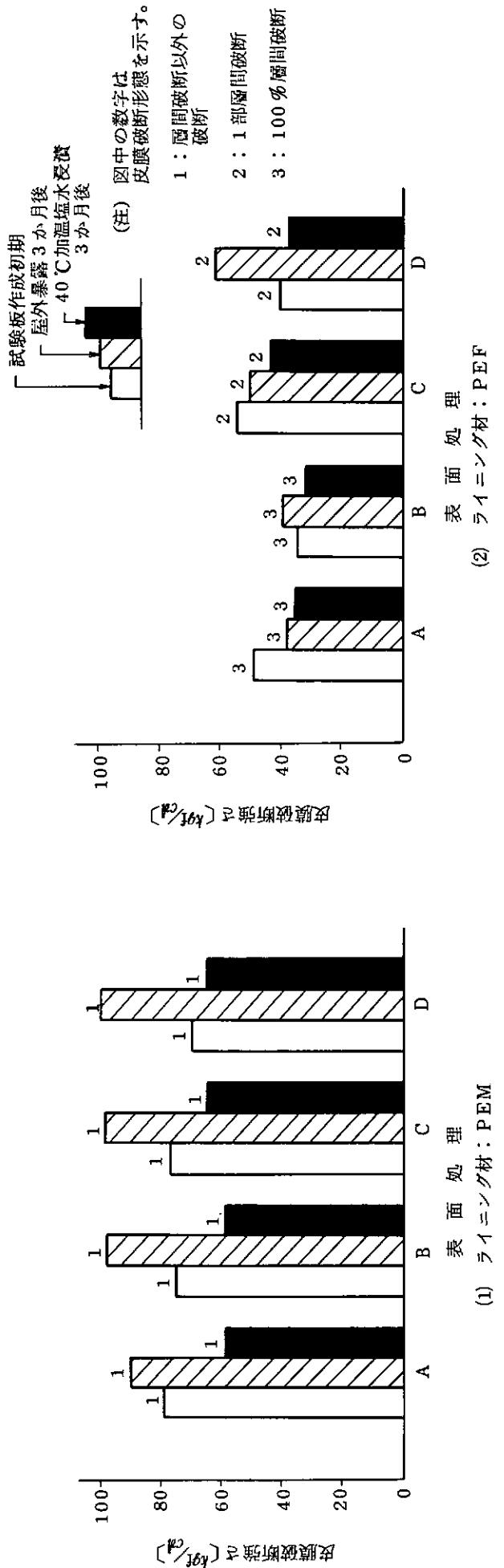


図 5.1 同種ライニング材の塗り重ね時の表面処理と付着性との関係

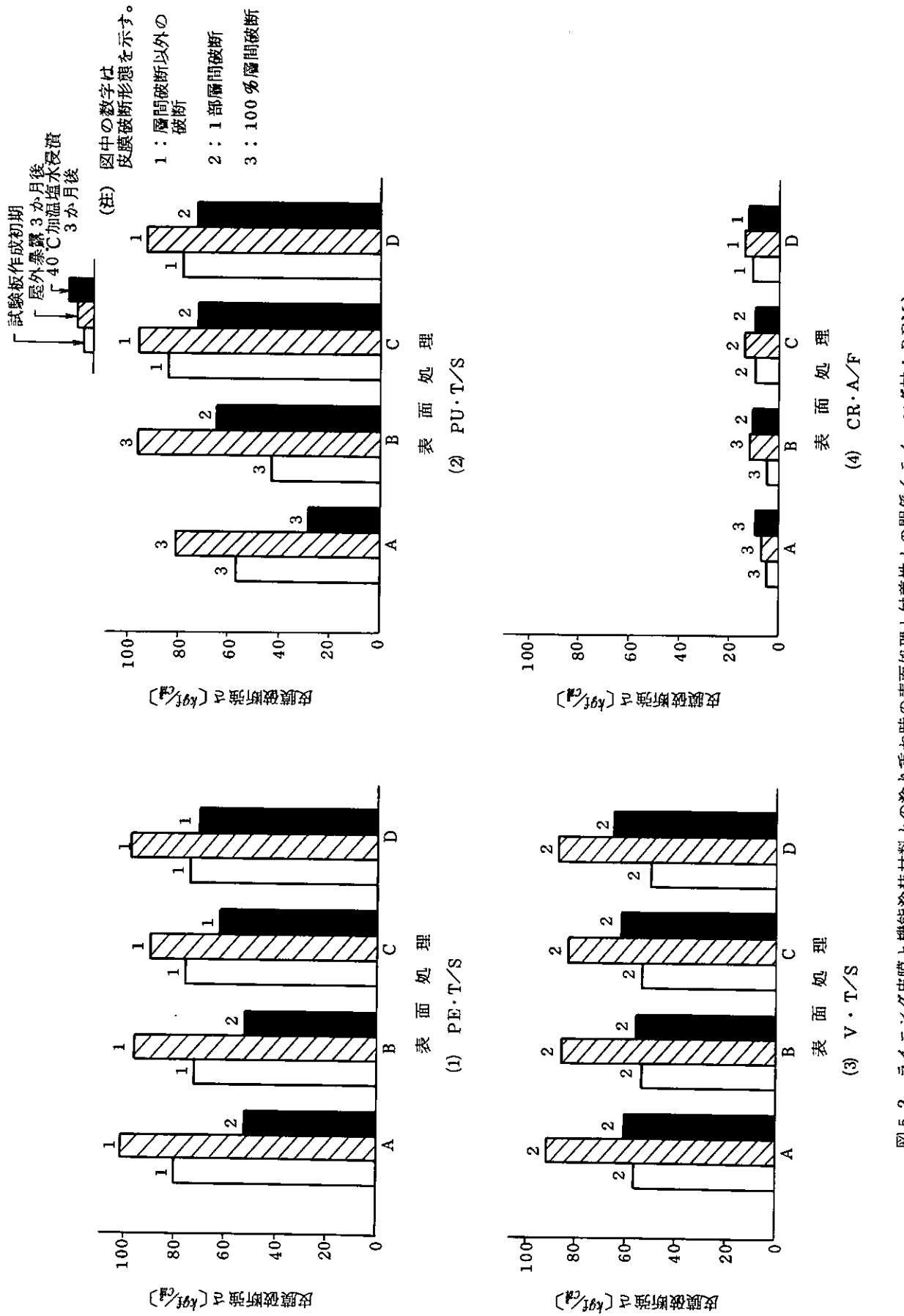


図 5.2 ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時の表面処理と付着性との関係(ライニング材: PEM)

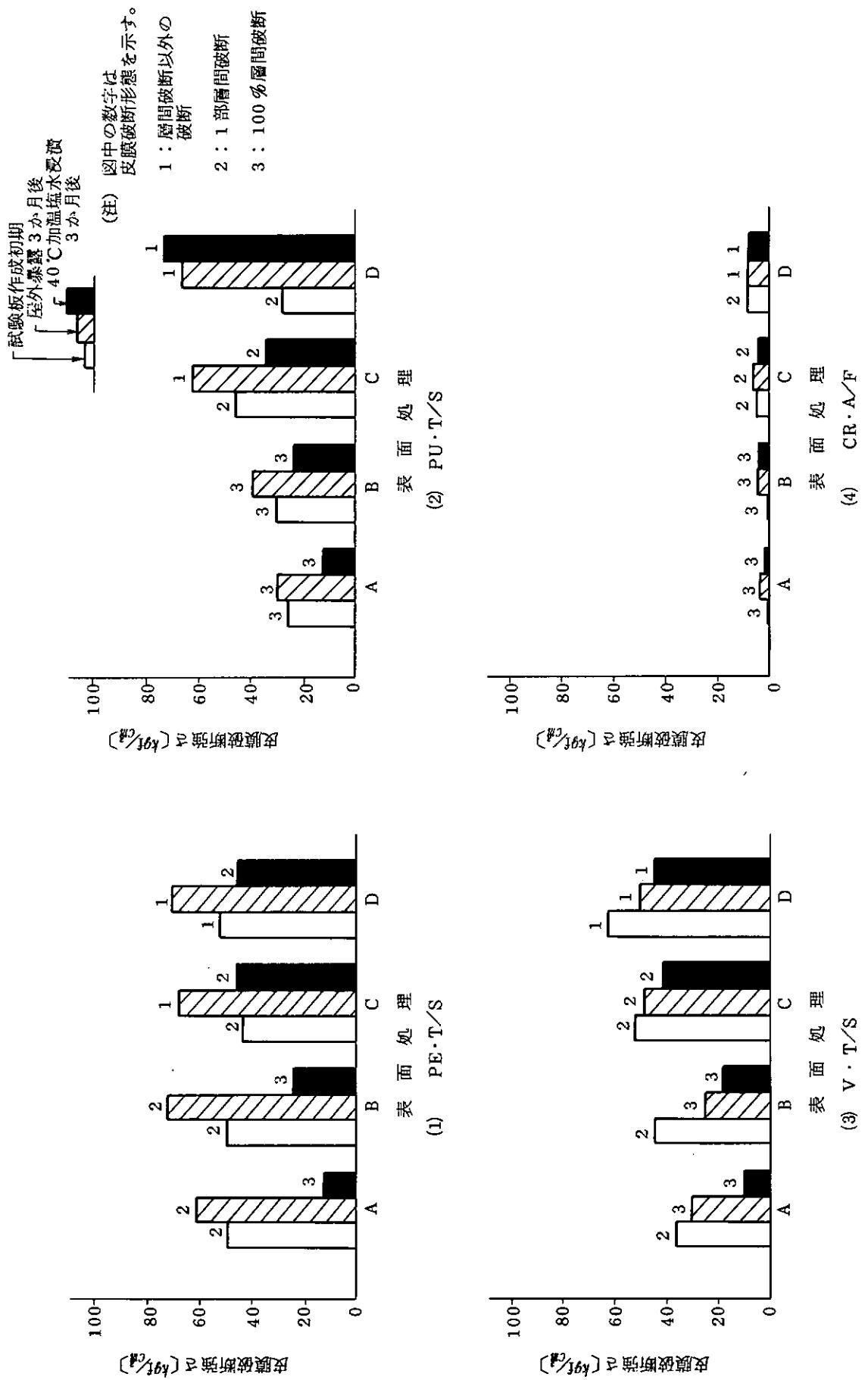


図5.3 ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時の表面処理と付着性との関係(ライニング材: PEF)

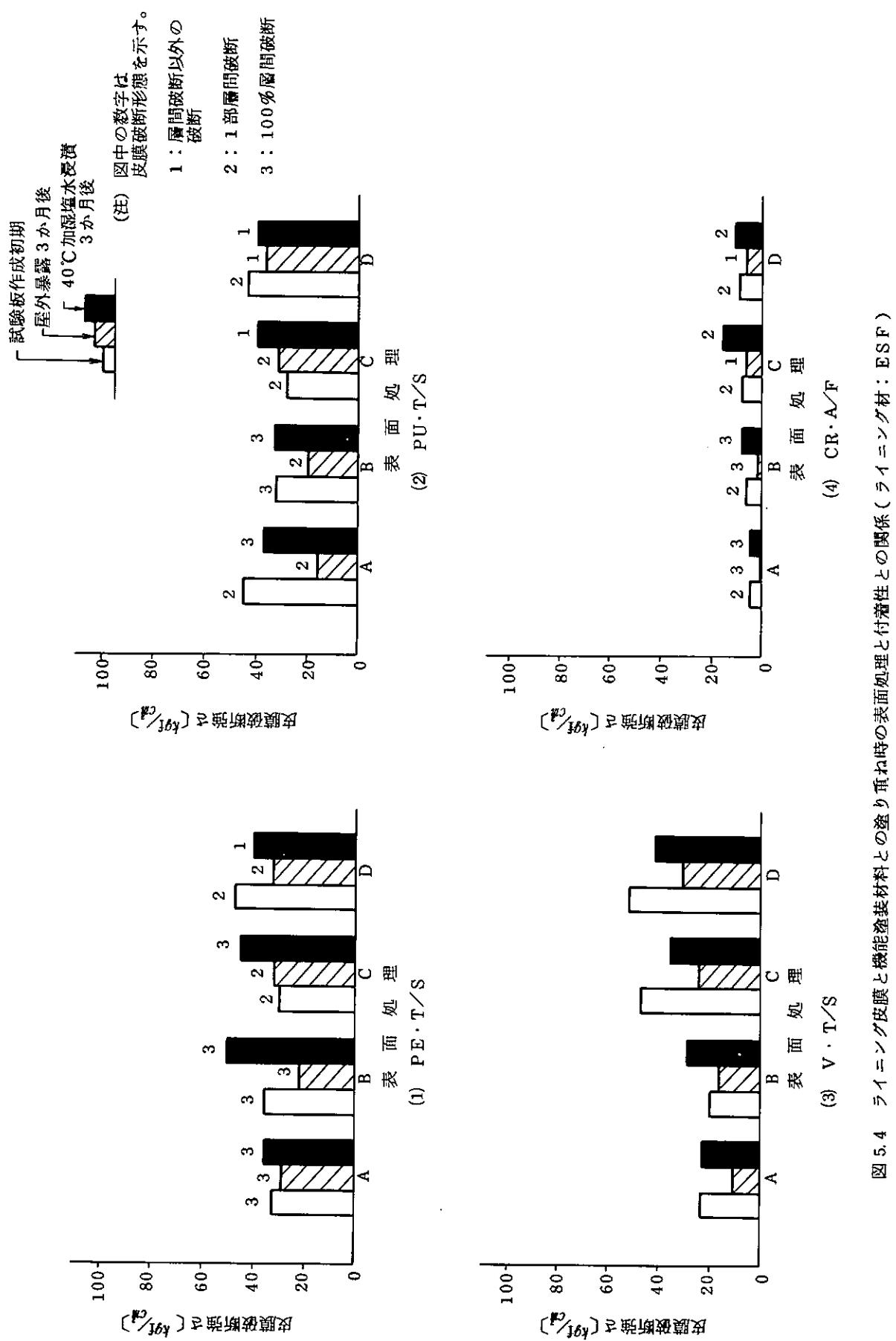


図 5.4 ライニング皮膜と機能接着材料との塗り重ね時の表面処理と付着性との関係(ライニング材: ESF)

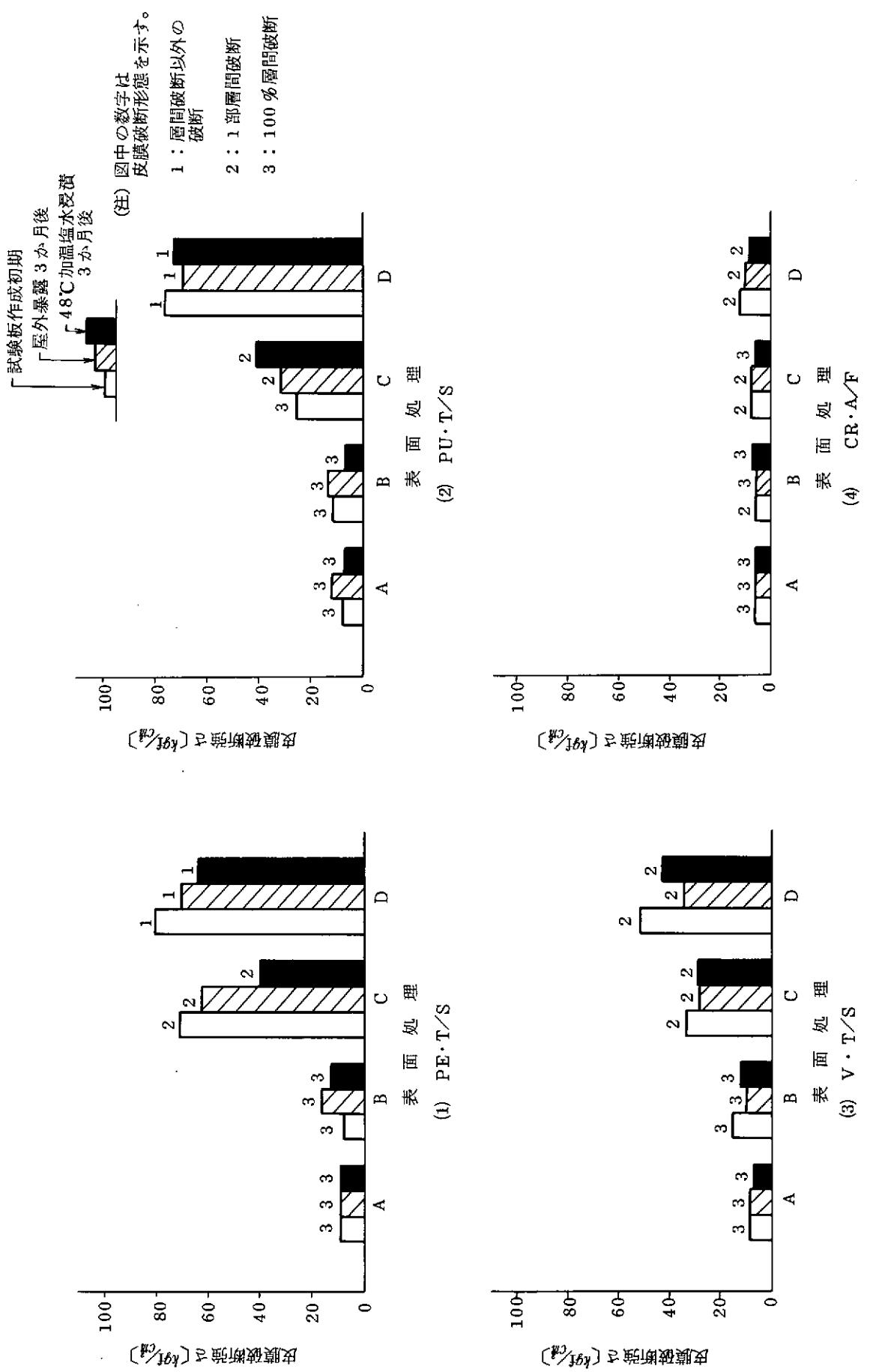


図 5.5 ライニング皮膜と機能塗装材料との塗り重ね時の表面処理と付着性との関係(ライニング材: TEF)

表 5.5 ライニングと機能塗装材料との塗り重ね時の
表面処理と皮膜破断形態

表面処理		A	B	C	D
ライニング		T/S&A/F			
P E M	PE・T/S			○	○
	PU・T/S				
	V・T/S				
	CR・A/F				○
P E F	PE・T/S				
	PU・T/S				○
	V・T/S				○
	CR・A/F				○
E S F	PE・T/S				
	PU・T/S				○
	V・T/S				○
	CR・A/F				
T E F	PE・T/S				○
	PU・T/S				○
	V・T/S				
	CR・A/F				

5.3 まとめ(ライニング施工マニュアル)

海洋構造物に適用する防食材料は長期耐久性を要求されるがその性能を十分に発揮させるには最適な防食施工法で施工しなければならない。

防食施工法については昭和56年度から59年度までの4箇年間にわたり調査検討を行ってきた。

本防食施工マニュアルは現在までの防食施工法の調査検討の結果をもとに厚膜被覆材であるライニング材を対象にその防食施工のポイントを各ライニング材ごとにまとめた。

なお、この防食施工における塗装システムは現在一般化されているショッププライミング方式を前提としてまとめている。

(1) エポキシモルタルライニング(PEM)

(a) 下地処理

(i) 原板blast

鋼板は通常の原板blast処理、すなわち除錆度SPSS Sd2以上又はSh2以上に仕上げる。

(ii) ショッププライマ

無機ジンクプライマ、有機ジンクプライマ及びノンジンクプライマのいずれに対してもPEMは適合性を有している。中でもノンジンクプライマは最も適合性を有している。(昭和57年度報告書No.357号 P.93参照)

(iii) 2次表面処理

ショッププライマ面の表面処理はパワーツール処理、blast処理のいずれでも適用性があるが、付着性を十分に発揮させるためにはパワーツール処理より適度の表面あらさを示すblast処理の採用が望ましい。その処理グレードはショッププライマを30~40%除去した程度で良い。

ショッププライマがなく、さびた鋼板面の素地調整はパワーツール処理では十分な付着性が得られず、SPSS Sd3程度のblast処理が必要である。(昭和57年度報告書No.357号 P.104参照)

なお、溶接部は通常、さび発生が早期に現われる箇所であり事前にスパッタ、スラグなどを除去した後、SPSS Sd3のblast処理が必要と思われる。

(b) 塗装要領

(i) 環境温度

本試料PEMは非常に高粘度材料であり、特に環境温度の変化により、流動性や皮膜硬度速度に影響を受ける。低温時では流動性が低下し、塗装作業が困難となる。低温時に塗装する場合は5%以下のシンナー添加により流動性を良くする必要がある。但し、この場合の皮膜硬化は長時間必要である。30℃程度の比較的高温時では1時間以内に皮膜硬化するため、塗装作業の迅速化、材料の冷却などの配慮が必要である。(昭和58年度報告書 No.369号 P.142参照)

(ii) 塗装作業

塗装を連続して行う場合は、高粘度被覆材塗装用特殊スプレー機を必要とする。(58年度報告書No.369号 P.143 図4.2.4参照)この塗装機におけるスプレー性は材料の吐出量を調整するポンプエア圧力及び吐出する材料を霧化させる霧化エア圧力のバランスが重要である。この圧力バランスは材料の流動状態によって適正にすることが重要である。

塗装条件とスプレー性との関係の1例は、昭和58年度報告書No.369号 P.143~146を参考願いたい。

(iii) 膜厚

PEMはチクソトロピック性が大きいため、塗装後の皮膜表面には凹凸が著しく、正確な膜厚管理は難しい面があり、頻繁にウェットゲージで確認する必要がある。

皮膜表面の凹凸は半硬化過程において、シンナーを含浸させたローラーで皮膜表面を押え、滑めらかにすることが望ましい。

IV) 塗り重ね間隔

(1) 同種ライニング材との塗り重ね

同種材料 P E M を塗り重ねる場合の間隔は 30 日以内では良好な付着性を示す。（昭和 57 年度報告書 No. 357 号 P. 119 ~ 121 参照）

(2) 機能塗装材料との塗り重ね

P E M と機能塗装材料を塗り重ねる場合の間隔は表 5.6 のとおりにしなければならない。

表 5.6 エポキシモルタルライニング (P E M) と
機能塗装材料との塗り重ね間隔

機能塗装材料 ライニング		PE・T/S	PU・T/S	V・T/S	CR・A/F
P E M	最長 塗り重ね間隔	7 日	層間付着性が 悪く、表面あ らしを行う。	3 日	30 日 ただし、A/F の長期暴露は さける。
	最長塗り重ね 間隔を越えた 場合。	表面あらしを 行う。	表面あらしを 行っても問題 あり。	表面あらしを 行っても問題 あり。	表面あらしを 行う。

(2) エポキシガラスフレークリайн (P E F)

(a) 下地処理

(i) 原板blast

鋼板は通常の原板blast処理、すなわち、除銹度 SPSS Sd2 以上又は Sh 2 以上にしなければならない。

(ii) ショッププライマ

無機ジンクプライマ、有機ジンクプライマ及びノンジンクプライマのいずれも P E F との適合性に問題がある。（昭和 57 年度報告書 No. 357 号 P. 93 参照）

(iii) 2 次表面処理

ショッププライマ面に適用する場合はショッププライマ塗膜をblast処理により 30 ~ 40 % 以上除去しなければならない。

さびた鋼板面の素地調整はblast処理により SPSS Sd3 にしなければならない。（昭和 57 年度報告書 No. 357 号 P. 104 参照）

なお、溶接部は通常、さび発生が早期に現われる箇所であり事前にスパッタ、スラブなどを除去した後、blast処理により SPSS Sd3 にする必要があると思われる。

(b) 塗装要領

(i) 環境温度

P E F は環境温度の変化によって流動性に影響を受ける。又、皮膜の硬化は材料の発熱と相まって急激に起こり、特に 30 °C 程度の高温時では材料の混合 1 時間経過後、急激に皮膜が硬化する。このため、塗装作業は作業の迅速化や材料の冷却などの配慮が必要である。（昭和 58 年度報告書 No. 369 号参照）

(ii) 塗装作業

塗装作業にともなう必要機器の 1 例を表 5.7 に示す。

表5.7 塗装機器の1例

塗装機器		備考
塗装機	高圧縮比型 エアレス塗装機(圧縮比45:1)	※ 材料がガンのニードル部を通過せず、チップ部に直接流れるタイプのガン。
スプレーガン	シンクガン(日本グレイ様)※	
スプレーチップ	チップNo.643(日本グレイ様)程度のもの	

環境温度10℃程度の比較的低温時の塗装は困難であり、10%程度のシンナー希釈が必要である。この比較的低温時の塗装条件とスプレー性との関係は昭和58年度報告書No.369号 P.149を参照願いたい。

(iii) 膜厚

PEFはチクソトロピック性が大きく、又スプレー性との関係で吐出量の多いチップを使用するため、膜厚のバラツキは大きくなるきらいがある。このため、膜厚管理には十分に注意しなければならない。

(iv) 塗り重ね間隔

(i) 同種ライニング材との塗り重ね

同種材料のPEFを塗り重ねる場合の間隔は最長7日にしなければならない。塗り重ね間隔を越えた場合は表面あらしを行っても層間はく離を完全になくすることは困難であり、対策が必要である。

(ii) 機能塗装材料との塗り重ね

PEFに機能塗装材料を塗り重ねる場合の間隔は表5.8のとおりにしなければならない。

表5.8 エポキシガラスフレークリайнイング(PEF)
機能塗装材料との塗り重ね間隔

ライニング	機能塗装材料	PE・T/S	PU・T/S	V・T/S	C R・A/F
PEF	最長 塗り重ね間隔	いずれの塗り重ね間隔においても層間付着性に問題がある。			
	最長塗り重ね 間隔を越えた 場合	表面あらしを 行っても問題 がある。	表面あらしを 行う。	表面あらしを 行う。	表面あらしを 行っても問題 がある。

(3) ポリエステルガラスフレークリайнイング(ESF)

(a) 下地処理

(i) 原板blast

鋼板は通常の原板blast処理、すなわち、除錆度SPSS Sd2以上又はSh2以上に仕上げる。

(ii) ショッププライマ

無機シンクプライマ及び有機質シンクプライマはESFとの適合性を有しているが、ノンシンクプライマとの適合性には問題がある。(昭和57年度報告書No.357号 P.93参照)

(iii) 2次表面処理

ショッブプライマ面の表面処理はプラスト処理により、ショッブプライマを30~40%除去しなければならない。

ショッブプライマがなく、さびた鋼板面の素地調整はプラスト処理によりSPSS Sd3にしなければならない。(昭和57年度報告書No.357号 P.104参照)

なお、溶接部は通常、さび発生が早期に現われる箇所であり事前にスパッタ、スラブなどを除去した後、SPSS Sd3のプラスト処理が必要と思われる。

(b) 塗装要領

(i) 環境温度

ESFは環境温度の変化によって流動性にはほとんど影響を受けないが、皮膜の硬化時間は大きく影響される。特に環境温度10°C程度の比較的低温時での皮膜硬化は長時間を要する。なお、皮膜硬化時は材料の発熱により急激に硬化する。(昭和58年度報告書No.369号参照)

(ii) 塗装作業

塗装作業に必要な塗装機器の1例は表5.7に示したものと同じである。

環境温度10°C程度の比較的低温時でも塗装は良好に行える。塗装条件とスプレー性との関係の1例は昭和58年度報告書No.369号を参照願いたい。

(iii) 膜厚

ESFは流展性に乏しいため、塗装後の皮膜表面は若干凹凸状になり、膜厚のバラツキが生じる生じる傾向にある。又、吐出量の大きいチップを使用するため、膜厚管理には十分に注意しなければならない。

(iv) 塗り重ね間隔

(1) 同種ライニング材との塗り重ね

同種ライニングESFを塗り重ねる場合の間隔は最長7日以内にしなければならない。塗り重ね間隔を越えた場合は表面あらしを行わなければならない。

(2) 機能塗装材料との塗り重ね

ESFに機能塗装材料を塗り重ねる場合の間隔は表5.9のとおりにしなければならない。

表5.9 ポリエスチルガラスフレークライニング(ESF)と機能塗装材料との塗り重ね間隔

機能塗装材料 塗り重ね		PE・T/S	PU・T/S	V・T/S	CR・A/F
ESF	最長 塗り重ね間隔	いずれの塗り重ね間隔においても層間付着性に問題がある。	3日以内 但し、適用環境状態に注意	層間付着性に問題がある。	
	最長塗り重ね 間隔を越えた 場合		表面あらしを行う。		

(4) タールエポキシガラスフレークライニング(TEF)

(a) 下地処理

(i) 原板プラスト

鋼板は通常の原板プラスト処理、すなわち、除銹度SPSS Sd3以上、又はSh2以上にしなければならない。

(ii) ショッププライマ

有機シンクプライマはT E Fとの適合性を有しているが、無機シンクプライマ及びノンシンクプライマは適合性に問題がある。（昭和57年度報告書No.357号 P. 93参照）

(iii) 2次表面処理

ショッププライマ面の表面処理はパワーソール処理及びプラスト処理のいずれでも適用できる。しかし適度の表面あらさを示すプラスト処理の方が良い、その処理グレードはショッププライマを30～40%以上除去した状態が良い。

ショッププライマがなく、さびた鋼板面の素地調整はプラスト処理によりSPSS Sd3にしなければならない。なお、パワーソール処理の適用は付着性に問題がある。（昭和57年度報告書No.357号参照）

溶接部は一般にさび発生が早期に現われる箇所であり、事前にスパッタ、スラグなどを除去した後、SPSS Sd3のプラスト処理が必要と思われる。

(b) 塗装要領

(i) 環境温度

T E Fは環境温度の変化によって、若干流動性に影響があるが、その影響度は比較的少ない。皮膜の硬化は環境温度20°Cでは緩慢であるが、30°Cの比較的高温時では材料混合約2時間後、急激に進行する。（昭和58年度報告書No.369号参照）

(ii) 塗装作業

塗装作業に必要な塗装機器の1例は表5.7に示したものと同じである。

環境温度10°C程度の比較的低温時の塗装はシンナー添加なしでは良好なスプレー性が得られず、5%程度のシンナー希釈が必要である。

塗装条件とスプレー性との関係は昭和58年度報告書No.369号P.141, P.148を参照願いたい。

(iii) 膜厚

T E Fはチクソトロピック性が大きく、スプレー性との関係で吐出量の多いチップを使用するため、膜厚のばらつきは大きくなる傾向がある。このため、塗膜管理には十分に注意を払わなければならない。

(iv) 塗り重ね間隔

(1) 同種ライニング材との塗り重ね

T E Fを塗り重ねる場合の間隔は最長3日にしなければならない。塗り重ね間隔を越えた場合はT E F皮膜の表面あらしを行う必要がある。

(2) 機能塗装材料との塗り重ね

T E Fに機能塗装材料を塗り重ねる場合の間隔は表5.10のとおりにしなければならない。

表5.10 タールエポキシガラスフレークライニング(T E F)と機能塗装材料との塗り重ね間隔

機能塗装材料 ライニング		P E • T/S	P U • T/S	V • T/S	C R • A/F
T E F		最長 塗り重ね間隔	いずれの塗り重ね間隔においても層間付着性に問題がある。		
T E F		最長塗り重ね 間隔を越えた 場合	表面あらしを行っても層間付 着性に問題がある。		

以上

あとがき

本研究の最終年度である59年度の研究報告として、ここに、59年度において実施してきた内容も含め、5箇年間の検討結果を各検討項目ごとに要約して説明する。

(1) 重防食材料の調査

本研究を開始した初年度(55年度)には、各種防食材料に関するアンケートを行い、非金属防食材料、金属防食材料及び数種防食法の併用効果についてとりまとめた。又、非金属防食材料の中から塗装系5種、ライニング系3種、合計8種の防食仕様を選択、設定し、それらの機械的強度や劣化の経時変化について、その後4箇年間にわたって追跡調査を実施してきた。これらを要約すると以下のとおりである。

- (a) アンケートによれば、長期防食用として推奨あるいは実施された防食仕様は、無機シンク塗料とエポキシ塗装の組合せ仕様(洋上大気部)、厚膜ライニング仕様(飛沫帶)、無機シンク塗料とタールエポキシ塗料の組合せ(海中部)などが多いことが判明した。
- (b) 又、アンケートによれば、金属防食材料は適用性や経済性の面で問題があるためか、施工例が少ないととも分った。
- (c) 設定した各仕様に対して行った各種の機械的強度特性については、経時とともにかなり変化するものもあったが、全般的には初期に比べて経時変化も少なく、強度的にも長期耐久性が期待できるものが多くなった。
- (d) 強度特性の中で、繰返し応力付加試験を行ったところ、十分な試験条件とはい難いが、仕様の中にはかなり高い応力に耐えるものもあり、被覆施工による耐久性向上が期待できる。
- (e) いずれの防食仕様とも、暴露や浸漬試験において、発さびや皮膜割れなど防食上重大な皮膜欠陥は見られなかった。ただし、暴露試験では表面のショーキングが著しく、退色が見られた。

(2) 海洋環境下での構造物の防食性試験

実環境における構造物の防食性試験として計画した本検討項目では、初年度(55年度)においてモデル構造物(試験体)の設計と試験体設置場所を決定し、次年度(56年度)に試験体を製作して実環境(長崎港内)に係留設置した。その後3箇年間にわたり、適用した防食仕様の防食効果や試験体のひずみと海象条件などの関係について調査・解析を行った。それらの概要是以下のとおりである。

- (a) 双胴型の浮体式試験体を設計・製作し、長崎港口の三菱重工(神奈川工場)の外海側に係留した。
- (b) この浮体試験体には、塗装系仕様6種、ライニング系仕様5種の防食被覆材を施工し、海中部、飛沫部、大気部の各部位並びに応力集中部(パイプ構造)を設けた。
- (c) 海中部には多くの海洋生物が付着し、適用した塗装系仕様の一部では生物除去時に塗膜に損傷を生ずるものも見られたが、ライニング系仕様のものはほとんど異常がなく良好であった。
- (d) 各部位とも防食被覆材の外観状態は良好であり、現時点では耐久性の面で何ら問題は見られない。
- (e) 海中部対象被覆材の中には、電気化学的な評価では塗膜劣化の傾向を示すものも見られたが、外観評価との相関係があまり認められず、今後、さらに長期にわたっての追跡調査・検討が必要である。
- (f) 大気部に適用した仕様の表面にはショーキング(白亜化)が見られ、その程度の大小はあるが、防食性能面の問題はない。
- (g) 応力集中部に生じた最大応力は $4.2 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ (ひずみ0.02%)であり、このひずみは年間 1×10^4 回程度の頻度で生じていることが判明した。又、年間におけるひずみの繰返し数は 1×10^7 回程度であり、この数は波の回数とほぼ一致している。
- (h) 応力 $4.2 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 程度の下では、塗装系及びライニング系のいずれの仕様とも皮膜損傷はなく、実験室的な繰返し応力値の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{6}$ 程度であり、防食性能面では何ら問題はない。

(3) 防食材料の寿命推定法に関する検討

各種防食材料の防食機能とその寿命を比較的短期間で推定・評価する手法を確立するため、材料の劣化促

進試験法とその劣化判定試験法について、5箇年にわたり、各種の検討を行ってきた。それらの概要は以下のとおりである。

- (a) 劣化促進試験としては、塩水浸漬試験、塩水噴霧試験、促進耐候試験、熱サイクル試験、熱冷衝撃試験及びこれらを組み合せたものについて検討した。塩水浸漬試験では、浸漬液の種類と温度、溶存酸素などを変化させた。
- (b) 劣化判定試験法としては、一般的な引張強度、ガス透過率、電気抵抗（体積抵抗、表面抵抗及びインピーダンス）及び鋼板との付着力の測定の他に、イオン電極法による塩素イオンの透過性（58～59年度検討）やカレントインターラプター法による塗膜下腐食速度（59年度検討）について検討した。
- (c) 検討結果、塗膜の劣化要因としては、塩水浸漬試験の浸漬液の温度効果が大きく、その劣化状態はインピーダンス測定による抵抗及び $\tan\delta$ の変化量をとらえることが有効であった。（56年度実施）
- (d) 塗膜中の塩素イオンの透過性は、イオン電極法により比較的容易に測定できることがわかったが（58～59年度実施）、塩素イオンの透過性と塗膜劣化との相関はあまり明瞭でなかった。
- (e) 劣化促進として熱冷衝撃試験を行い、試験前後のインピーダンス測定、付着力測定及び曲げ試験を行った結果、熱冷衝撃は塗膜の劣化促進を行う可能性があることが判明した。（58～59年度実施）
- (f) 又、劣化促進として、促進耐候試験と60°C、3%塩水浸漬試験を組合せた方法が、比較的良好なことが分った。さらにカレントインターラプター法で求めた塗膜下腐食速度により、塗膜下の腐食状況がかなり明瞭に判断できることが判明し、本法で求めた測定値は寿命推定に利用できることが分った。また、交流法を直流法で求めた塗膜の電気抵抗には一定の関係があることが分った。高抵抗値では、直流法による計測が精度的に優れていることが判明した。（59年度実施）
- (g) 各章において、過去に得られた各種データの中から、特にエポキシ系防食塗膜に注目して解析した。その結果、初期劣化は先づ塗膜の限界ひずみの低下に始まり、次いで電気抵抗値が急速に低下する時期が認められる。などの知見が得られた。（59年度実施）

(4) メインテナンス方法の調査検討

メインテナンスを対象とした浮体構造物などを用いて、材料の選定や施工法について、5箇年間にわたりて検討してきた内容や得られた知見を要約すると以下のとおりである。

- (a) 防食仕様8種を適用した洋上大気暴露試験体や試験板において、約3箇年の経年変化はほとんど認められない。しかし、メインテナンス施工時期を知るために、適用した防食仕様の電気的特性並びに物理的特性を定期的に検査することは重要である。
- (b) 現在開発されている水中硬化型塗料による補修に関し、水中施工の場合には水中クリーニングした鋼材面への付着性よりも旧塗膜面への付着強度が大きい傾向がある。
- (c) 飛沫部や干満部に対し、大気中で補修施工した場合、没水までのインターバルや養生方法にかかわらず、下地処理グレードが性能に大きく影響することが判明した。又、本研究に供試した塗料による補修に関する指針を得ることができた。ただし、大面積の補修が対象の場合には、施工の機械化が望まれる。
- (d) 実構造物の没水部に対し、電気的特性並びに物性の検査を実施することは容易ではないが、最近開発されている水中メインテナンス機器を活用することにより、陸上で水中での状況を十分に把握することが可能であり、生物除去（水中クリーニングによる）さえ実施すれば塗膜状態も比較的容易に観察できることが確認された。

(5) 防食施工法の調査検討

有機樹脂系厚膜ライニング材料4種に対し、施工に関連するいくつかの項目について、56年度から4箇年にわたりて検討してきた。又、最終年度である（59年度）には、4箇年間のデータをベースに、供試した4種のライニング材の施工マニュアルを作成した。なお、各調査内容について得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (a) 現在、一般化しているショットブライミング方式が適用できるライニング材はエポキシモルタルライ

ニング(P E M)とポリエステルガラスフレークライニング(E S F)であるが、それぞれ適性が異なるので、ショッププライマーの選択に注意を要する。

- (b) 裸鋼材に適用する場合には、ライニング材の種類によって要求グレードは多少異なるが、いずれもペースト処理が好ましい。(5 6 ~ 5 7 年度実施)
- (c) 同種ライニング材料の塗り重ねや一般塗料材料を塗り重ねる場合には、ライニング材の種類や上塗塗料の種類によって、インターバルや前処理に注意を要する場合が多い。(5 7 年度及び 5 9 年度実施)
- (d) 各種ライニング材の性状特性は、それぞれかなり異なっており、施工時にはシンナー希釈を必要とするもの、高温条件(3 0 ℃程度)下では可使時間が短いもの、特殊な施工機器を必要とし、施工条件にかなり制約のあるもの、施工時のタレ限界膜厚が小さく注意を要するものなど各種各様の特徴を有することが判明した。(5 8 年度実施)

以上、5箇年計画で実施してきた本研究の最終年度にあたる 5 9 年度の研究報告書のあとがきとしては、5箇年間に得られた結果についての概要を述べてきた。ここに示した内容は初期計画に対して必ずしも十分に満足できるものではない。長期耐久性を有する防食材料を 5 篇年間でその寿命を評価あるいは推定することは困難であり、さらに数箇年の期間が必要である。殊に、本研究において選定した各種防食仕様に対し、採用した防食材料はいずれも代表的な市販製品ではあるが、これらと同系統の防食材料は他にも非常に多く、しかも、すでにかなりの使用実績を有するものも多い。さらに、材料・技術開発の進展の早い今日では、5年前の製品とは一段と性能の良い防食材料も市場に出ているものと思われる。本報告書に述べる研究データは、採用検討した各種防食材料の特性とその傾向であり、本研究で検討できなかった同系統の防食材料すべてが必ずしも同じ特性や傾向を有するとは限らない。従って、この種の防食材料の適用にあたっては、ユーザーや材料メーカーにおいて、再度この種の検討を行い、確認の上で採否の判断を下すとともに、少しでも多くのデータが公開されることを期待している。

最後に、本研究を終るにあたり、本研究の実施過程において、新たに発生した技術的課題や、十分に検討できなかった問題、さらに海洋構造物の防食対策として、技術上重要であると思われる課題など以下にその項目をあげる。

- ① 防食塗膜の機械的強度試験データに及ぼす試験環境温度の影響
- ② 繰返し曲げ応力付加条件下における各種防食皮膜の耐久性
(防食材料、膜厚、塗膜欠陥の有無、環境温度などと応力との関連で皮膜の耐久寿命を知る)
- ③ 電気防食併用下における防食材料の耐久性
(流電陽極方式、外部電源方式との違いなど)
- ④ 塗膜劣化要因の定量的、科学的解明
(温度、湿度、紫外線、応力などが劣化に及ぼす度合を定量的に、しかも科学的に解析する)
- ⑤ 防食寿命推定のための劣化促進法と評価判定法
(本研究で行えなかった促進法について検討し、さらに劣化の最適評価法を見い出す)
- ⑥ 防食性能の長期にわたる確認試験
(浮体構造物の防食性試験の継続)